

**Berichte
aus dem
Institut für Meereskunde
an der
Christian-Albrechts-Universität Kiel**

Nr. 212

**Luminophoren und ein neues Bildauswertungssystem
zur Darstellung des bioturbaten Partikeltransports
in marinen Sedimenten**

**Luminophores and a new scanning system
for demonstration of the bioturbat partikeltransport
in marine sediments**

DOI 10.3289/IFM_BER_212

**von
Michael W. Teucher**

1991

Kopien dieser Arbeit können bezogen werden von:

Institut für Meereskunde

-Abt. Meeresbotanik-

Düsternbrooker Weg 20

2300 Kiel

**Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der
Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
vorgelegt von Michael W. Teucher, Kiel, 1991**

Danksagung

Ermöglicht wurde diese Arbeit durch das BMFT-Projekt "Biomechanische Einwirkungen auf die Konzentration von Schad- und Nährstoffen im Meeressediment" (MFU 0559A1).

Ich danke Dr.G.Graf und Prof.Dr.S.Gerlach für ihre wertvollen Anregungen zur Fertigstellung meiner Arbeit.

Mein besonderer Dank gilt Wolfgang Queisser; er hatte immer ein offenes Ohr für mich und half, technische und andere Probleme zu lösen.

Sabine Scheibe danke ich für ihre tatkräftige Unterstützung bei der Laborarbeit und bei Ausfahrten zur Probennahme.

Dr.U.Eversberg stand mir bei Computerproblemen mit Rat und Tat zur Seite.

Dank sei auch den Besatzungen der Forschungsschiffe "Poseidon", "Littorina" und "Alkor" für Ihre gute Zusammenarbeit sowie Christian Schache und der Forschungs- tauchgruppe für die Unterstützung bei meinem in situ Experiment in der Kieler Bucht.

Heinrich Engel danke ich für die Korrekturen des Manuskripts.

Allen genannten und vielen ungenannten Freunden und Kollegen danke ich für ihre Hilfen, ohne die diese Arbeit nicht möglich gewesen wäre.

Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurden in marinen Sedimenten Untersuchungen zur bioturbationsbedingten Partikelumlagerung durchgeführt. Als Tracer dienten Luminophoren (fluoreszierende Partikel).

Dazu wurde mit der Fa. SIS (Kiel) ein rechnergestütztes Luminophorenauswertungssystem (LAUS) zur Erkennung und Lokalisation von Luminophoren in Sedimenten entwickelt. Gemäß dem Konzept dieses Systems wurde eine Methode zur Untersuchung von Sedimentkernen in sehr dünnen Schichten (dünner als 1 mm) entworfen. Mittels einer durchsichtigen Klebefolie konnte die Oberfläche von Sedimentkernen abgetragen werden. Die Folien mit dem anhaftenden Sediment wurden auf schwarzen Karton geklebt und konnten dann vom LAUS gescannt werden.

In Tests konnte die Funktionsfähigkeit von Bildauswertungssystem und Präparationsmethode der Sedimentkerne nachgewiesen werden.

Mit dem LAUS konnten die Kornfraktionen 500-1000 µm (blau), 250-500 µm (rot), 125-250 µm (gelb) und 63-125 µm (grün) erkannt werden.

Bei diesen Tests des LAUS wurde festgestellt, daß einzelne Korngößen (Farben) über- oder unterschätzt werden können; aus diesem Grund müssen sedimentspezifische Korrekturfaktoren ermittelt werden. Ein in situ Experiment demonstrierte die Anwendbarkeit der Luminophorenmethode für Bioturbationsversuche im Freiland. Durch ähnliche Ergebnisse konnten Laborversuche bestätigt und ihre Interpretation ergänzt werden. Die Bioturbationsversuche zeigten, daß eine Benthosgemeinschaft innerhalb von 2-3 Tagen auf der Sedimenoberfläche liegende Partikel bis in 10 cm Tiefe einarbeitet.

Auf der Station Schlicksandgrund in der Deutschen Bucht konnte im Untersuchungszeitraum vom Oktober 1988 bis zum Oktober 1989 keine saisonale Variation in der Bioturbationsleistung der Benthosgemeinschaft nachgewiesen werden.

Auf der Station Schlicksandgrund in der Deutschen Bucht werden etwa $240-360 \text{ g m}^{-2}$ Sediment innerhalb eines Tages tiefer als 0.5 cm eingewühlt.

$150-225 \text{ g m}^{-2}$ Sediment pro Tag werden tiefer als 1 cm eingearbeitet und geraten damit unter die Durchschnittstiefe der Chemokline.

Der Rücktransport von Sediment in die ungerichtet durchmischte Oberflächenschicht muß in biologisch relevanten Zeiträumen (Tage bis wenige Wochen) aus Gründen des Gleichgewichts mengenmäßig dem Transport in die Tiefe entsprechen.

Für eine sandige Station in der Kieler Bucht (15 m Tiefe) kann der Partikeltransport pro Tag mit etwa $160-250 \text{ g m}^{-2}$ tiefer 0.5 cm und $70-100 \text{ g m}^{-2}$ tiefer 1 cm angenommen werden.

Im Bioturbationsexperiment mit *Nereis diversicolor* wurden tägliche Transporte in Horizonte tiefer 1 cm von etwa 370 g m^{-2} bei 4°C , etwa 40 g m^{-2} bei 8°C und etwa 210 g m^{-2} bei 16°C erreicht.

Summary

In the present work inert fluorescing particles (luminophores) were used to investigate bioturbative particle transport in marine sediments.

In cooperation with SIS (Kiel) a computer-supported scanning system (Luminophorenauswertungssystem = LAUS) was developed for identification and localisation of luminophores. A preparation method was adapted for this system in order to investigate sediment cores in very thin layers (< 1 mm). With a transparent, sticky foil it was possible to sample of the surface of a sediment core. The foil with the affixed sediment was placed on black pasteboard prior to analysis.

The functioning of the scanning system and the preparation method of sediment cores were tested in the laboratory.

With the LAUS the fractions 500-1000 μm (blue), 250-500 μm (red), 125-250 μm (yellow) and 63-125 μm (green) were detectable.

During the tests of LAUS it was ascertained that fractions (colors) were over- or underestimated depending on the type of sediment analysed. Sediment-specific correction factors were thus determined.

An in situ experiment demonstrated the applicability of the luminophore method to field studies. This results corroborated those from the laboratory.

The bioturbation experiments demonstrated that particles lying on the sediment surface were transported down to 10 cm by the benthic community.

During the investigations from October 1988 to October 1989 at the station "Schlicksandgrund" in the German Bight no variation in the bioturbation effects of the benthic community was detectable.

At this station "Schlicksandgrund" about 240-360 g m^{-2} sediment was buried down to 0.5 cm depth in 1 day.

150-225 g m^{-2} sediment per day was moved to below the chemocline i.e. deeper than 1 cm.

The depth distribution of luminophores with time showed that upward transport of sediment into the diffusive mixed surface layer counteracted the downward transport

of sediment to deeper layers due to biological activity. For a sandy station in Kiel Bight (15 m water depth) the particle transport per day amounted to 160-250 g m⁻² deeper than 0.5 cm and 70-100 g m⁻² deeper than 1 cm. In a bioturbation experiment with *Nereis diversicolor* daily transports deeper than 1 cm amounted to about 370 g m⁻² at 4°C; about 40 g m⁻² at 8°C and about 210 g m⁻² at 16°C.

Inhalt

1.	Einleitung	1
2.	Material und Methoden	2
2.1.	Stationen	2
2.2.	Sedimentparameter	4
2.2.1.	Wassergehalt des Sediments	5
2.2.2.	Kohlenstoffgehalt des Sediments	5
2.2.3.	Proteingehalt des Sediments	5
2.2.4.	Chlorophyll-a-Gehalt des Sediments	5
2.3.	Luminophoren als Partikeltracer	6
2.4.	Präparation der Sedimentkerne	7
2.5.	Systembeschreibung des Luminophorenauswertungssystems (LAUS)	9
2.6.	Bioturbationsversuche	11
2.6.1	Zeitserie zur Ermittlung der Experimentdauer mit Sedimenten aus der Deutschen Bucht	11
2.6.2.	Jahresgang der Bioturbationsleistung in der Deutschen Bucht	11
2.6.3.	Simulation einer Sauerstoffmangelsituation	12
2.6.4.	In situ Experiment in der Kieler Bucht	12
2.6.5.	Temperaturabhängigkeit der Bioturbationsleistung von <i>Nereis diversicolor</i>	13
3.	Ergebnis	14
3.1.	Sedimentparameter	14
3.1.1.	Wassergehalt des Sediments	14
3.1.2.	Kohlenstoffgehalt (Glühverlustbestimmung) des Sediments	17
3.1.3.	Proteingehalt des Sediments	20
3.1.4.	Chlorophyll-a-Gehalt des Sediments	23
3.2.	System- und Methodentests	26
3.2.1.	Vergleich zwischen Augen- und Maschinenzählung	26
3.2.2.	Test der Präparationsmethode	27

3.3.	Bioturbationsversuche	29
3.3.1.	Zeitreihe zur Ermittlung der Experimentdauer mit Sedimenten aus der Deutschen Bucht	30
3.3.2.	Jahresgang der Bioturbationsleistung in der Deutschen Bucht	33
3.3.2.1.	Station Schlicksandgrund	33
3.3.2.2.	Station Schlickgrund	35
3.3.3.	Simulation einer Sauerstoffmangelsituation	37
3.3.4.	In situ Experiment in der Kieler Bucht	40
3.3.5.	Temperaturabhängigkeit der Bioturbationsleistung von <i>Nereis diversicolor</i>	42
4.	Diskussion	48
4.1.	Methodik der automatisierten Luminophoren- auswertung mit LAUS	48
4.2.	Der Partikeltransport in den Bioturbationsversuchen	52
4.2.1.	Bioturbationsbedingte Sedimentumlagerungen auf der Station Schlicksandgrund in der Deutschen Bucht	52
4.2.2.	Bioturbationsbedingte Sedimentumlagerungen bei einem in situ Experiment in der Kieler Bucht	55
4.2.3.	Temperaturabhängigkeit der Bioturbationsleistung von <i>Nereis diversicolor</i>	57
4.3.	Die Bedeutung des bioturbaten Partikeltransports für die Schadstoffablagerung	60
5.	Literatur	63
6.	Datenanhang	
	Anhang A	
	Anhang B	
	Anhang C	
	Anhang D	
	Anhang E	

1. Einleitung

Für Fragen der Elimination oder Remobilisierung von Schadmetallen im marinen System spielen Prozesse der Partikelumlagerung im Sediment eine wichtige Rolle. Viele Schadstoffe sind an Partikel - vor allem an die Fraktion $\leq 20 \mu\text{m}$ - gebunden (Kersten & Krönke 1990) und unterliegen somit den Prozessen einer bioturbaten Partikelumlagerung, die sie in oxische oder anoxische Sedimentbereiche verfrachten kann. Der Aufenthaltsort von belasteten Partikeln entscheidet darüber, ob ihre Fracht löslich und deshalb leicht remobilisierbar oder schwerlöslich ist (Aller 1978, Kersten et al 1985). So sind z.B. die Metalle Cadmium, Zink, Kupfer und Nickel unter oxidierten Verhältnissen löslich. Werden sie, an Partikel gebunden, in sauerstofffreie Sedimentschichten verfrachtet, so gehen sie in schwerlösliche Metallsulfide über.

Um Aufschluß über Prozesse beim bioturbaten Partikeltransport und eine Abschätzung der dabei umgelagerten Sedimentmengen zu gewinnen, wurden im Rahmen des BMFT-Projekts "Biomechanische Einwirkungen auf die Konzentration von Schad- und Nährstoffen im Meeressediment" mit Luminophoren (fluoreszierende Partikel) als Tracer verschiedene Versuche durchgeführt.

In Laborexperimenten wurde an Sedimenten aus der Deutschen Bucht untersucht, ob sich ein Jahresgang beim bioturbaten Partikeltransport feststellen läßt. Ferner wurde der Einfluß einer Sauerstoffmangelsituation (mit 30% O_2 -Sättigung im überstehenden Wasser), wie sie in den letzten Jahren häufiger im Untersuchungsgebiet beobachtet wurde (Hickel et al 1989), auf die Partikelumlagerung durch die Benthosgemeinschaft getestet.

In einem in situ Experiment in der Kieler Bucht konnte die Luminophorenmethode auf ihre Eignung für Bioturbationsversuche im Freiland geprüft werden. Außerdem wurden die Resultate mit den Laborergebnissen verglichen.

In einem weiteren Laborversuch wurde der Einfluß der Temperatur auf die Wühl-tätigkeit von *Nereis diversicolor* in einem durch Sieben aufbereiteten sandigen Sediment aus dem Odensefjord (Insel Fünen, Dänemark) untersucht. Zur Aufarbeitung und Auswertung der in den Experimenten gewonnenen Proben wurde in Zusammenarbeit mit der Firma SIS (Kiel) ein rechnergestütztes Luminophorenauswertungssystem (LAUS) gebaut und getestet. Das LAUS erfaßt in entsprechend aufbereiteten Sedimentproben Zahl und Lage von Luminophoren und kann die Ergebnisse graphisch und numerisch darstellen.

Entsprechend der Konzeption des LAUS wurde ein Verfahren zur Präparation von Sedimentkernen entwickelt, um mit der Herstellung von sehr dünnen Schichten (dünner als 1 mm) ein effektives Scanning durch das LAUS zu ermöglichen.

2. Material und Methoden

2.1. Stationen

Für die Untersuchungen an Sedimenten aus der Nordsee wurden in der Deutschen Bucht zwei Stationen nahe Helgoland beprobt (s.Abb.1).

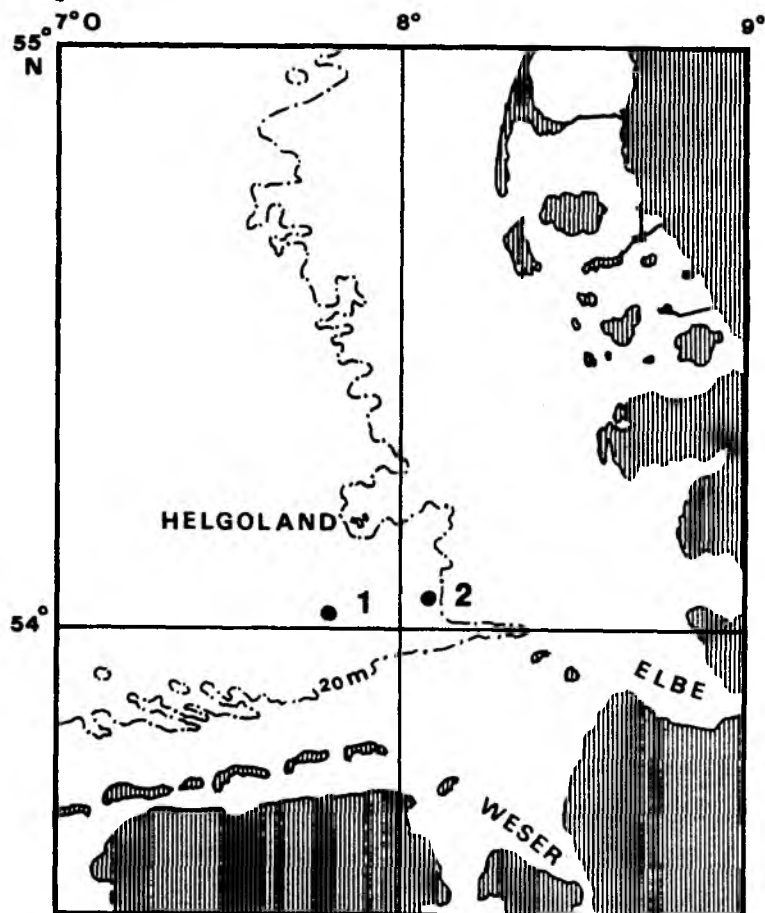


Abb. 1 Lage der Stationen "Schlicksandgrund" (1) und "Schlickgrund" (2) in der Deutschen Bucht

Die Station Schlicksandgrund ($54^{\circ}01'N$ $07^{\circ}49'E$) liegt etwa 10 sm südwestlich von Helgoland. Die Wassertiefe beträgt 35 m. Das Sediment ist ein Schlicksand mit folgender Korngrößenzusammensetzung: 500-1000 μm : 0.7%, 250-500 μm : 5.5%, 125-250 μm : 52.0%, 63-125 μm : 19.3% und <63 μm : 21.8%.

Die Station Schlickgrund ($54^{\circ}03'N$ $08^{\circ}05'E$) liegt etwa 10 sm südöstlich von Helgoland und im Bereich der Elbwasserfahne. Die Wassertiefe beträgt 22 m. Das Sediment ist ein feiner Schlick.

Ausgewählt wurden diese beiden Stationen, weil über sie seit den 20iger Jahren ein großer Datensatz über Faunenzusammensetzung und Besiedlungsdichten zum Vergleich vorliegt (z.b. Hagmeier 1925, Stripp 1969, Salzwedel et al 1985). Die faunistische Situation während der Untersuchungen beschreibt Kitlar (1991).

Als Station für ein vergleichendes in situ Experiment wurde die Süd-West-Ecke des "Hausgartengebiets" (15 m Tiefe) am Ausgang der Eckernförder Bucht (Kieler Bucht) gewählt (Rumohr 1980). Das Sediment setzt sich aus folgenden Korngrößen zusammen: $>1000\text{ }\mu\text{m}$: 3.1%, $500-1000\text{ }\mu\text{m}$: 15.5%, $250-500\text{ }\mu\text{m}$: 25.4%, $125-250\text{ }\mu\text{m}$: 51.7% und $<125\text{ }\mu\text{m}$: 4.4%. In der Nähe einer Begrenzungstone waren ein leichtes Wiederfinden des Experiments und ein genügender Schutz vor Schleppnetzen gewährleistet. Hier war auch eine Unterstützung durch die Forschungstauchgruppe der Universität Kiel möglich. Solche Bedingungen gab es in der Deutschen Bucht nicht.

Für ein Laborexperiment, das zusammen mit Arbeitsgruppen aus Arhus und Odense durchgeführt wurde, wurde ein sandiges Flachwassersediment vom Ausgang des Odensefjords (Insel Fünen, Dänemark) verwendet.

2.2. Sedimentparameter

Zur zusätzlichen Charakterisierung und Erfassung saisonaler Ereignisse auf den beprobten Stationen wurden routinemäßig Wasser-, Kohlenstoff-, Protein- und Chlorophyll-a-Gehalt des Sediments gemessen.

Für die Messungen wurden aus einem Großkastengreifer (50x50 cm) 3 Stechrohre (5 cm Innendurchmesser) ausgestochen und jeweils in 1 cm-Scheiben abgefüllt. Im Oktober 1989 wurde zur Gewinnung längerer Sedimentkerne ein kurzes Schwerelot (Rumohrlot) verwendet. Hier wurden die Kerne in 2 cm-Scheiben zerlegt. Aus diesen Proben wurden - nach gründlicher Durchmischung des Materials jeweils einzelner Sedimentscheiben - die Unterproben entnommen. Nach der Aufteilung der Proben wurde das Material bis zur endgültigen Messung eingefroren.

2.2.1. Wassergehalt des Sediments

Für die Wassergehaltsbestimmung wurden nach dem Auftauen der Probe 5 cm³ gründlich durchmischtes Sediment zunächst feucht und dann trocken (nach 12 h Trocknung bei 65°C) gewogen. Aus der Differenz wurde der Wassergehalt bestimmt.

2.2.2. Kohlenstoffgehalt des Sediments

Zur Abschätzung des Kohlenstoffgehalts mittels Glühverlust wurde die getrocknete Sedimentprobe (s. 2.2.1.) für 12 h bei 500°C verascht. Es wurde das aschefreie Trockengewicht (= organische Substanz) bestimmt. Der Kohlenstoffgehalt der Proben wurde mit 50% der organischen Substanz angenommen.

2.2.3. Proteingehalt des Sediments

Für die Proteinbestimmung wurden 10-100 mg getrocknetes und gemörsertes Sediment nach der Methode von Lowry et al (1951) aufgeschlossen und gemessen.

Der Begriff "Protein" wird hier im Sinne von Eversberg (1990) gebraucht. Bei der verwendeten Methode enthält das "Protein" auch schwer abbaubare Kohlenstoff-Stickstoffverbindungen wie z.B. Huminsäuren (Povolledo & Gerletti 1964).

2.2.4. Chlorophyll-a-Gehalt des Sediments

Für die Pigmentbestimmung wurde 1 cm³ Sediment mit 9 ml Aceton versetzt und homogenisiert. Nach Zentrifugation wurde der Pigmentgehalt (Chlorophyll-a) im Überstand photometrisch bestimmt (Jeffrey & Humphrey 1975).

2.3. Luminophoren als Partikeltracer

Luminophoren sind farblich markierte Tracer die in der Küsten- und Ingenieurgeologie zum Nachweis von Sedimentumlagerungen benutzt werden (Schwarzer 1989). Sie fluoreszieren unter UV-Licht und heben sich dadurch deutlich vom Hintergrund des übrigen Sediments ab. Im Gegensatz zu radioaktiven Tracern bedarf es keiner Sicherheitsvorkehrungen; Luminophoren sind ein leicht zu handhabender und kostengünstig herzustellender Tracer (Hoeg & Voigt 1967).

Luminophoren werden - wenn irgend möglich - aus Sedimenten des zu untersuchenden Gebietes hergestellt. Das Sediment muß dafür erst durch Waschen mit Süßwasser und Essigsäure gereinigt und dann getrocknet werden; anschließend erfolgt die Einfärbung (Ruck 1972).

Um eine Andersartigkeit der Luminophoren gegenüber dem natürlichen Sediment auszuschließen, wurden neue und in Meerwasser "gealterte" Luminophoren mit marinem Sediment unter dem Rasterelektronenmikroskop verglichen. Es konnten keine Unterschiede festgestellt werden.

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Experimente stellte mir Herr H. Peetz von der Bundesanstalt für Wasserbau (Außenstelle Küste) die in Tab.1 aufgezählten Luminophoren aus marinen Sedimenten her.

Tab.1 Zur Verfügung stehende Luminophoren
(mit Anzahl/Gramm und Standardabweichung)

Farbe	Größenklasse	n/g	s	s in %
Blau	500 - 1000 μm	1827	53	3%
Rot	250 - 500 μm	14699	728	5%
Gelb	125 - 250 μm	103400	4079	4%
Grün	63 - 125 μm	~680000*		

*) Unter der Annahme einer spez. Dichte von 2.6 g/cm³ und einer mittleren Korngröße von 94 μm

2.4. Präparation der Sedimentkerne

Das zu bearbeitende Probenmaterial aus den Bioturbationsexperimenten (s.Kap.2.6.) liegt zunächst als gefrorener Sedimentkern mit 10 cm Durchmesser vor. Gemäß der Konzeption des Luminophorenauswertungssystems (LAUS) mußte eine Methode entwickelt werden, bei der die Kerne in sehr dünnen Schichten, wenn möglich in Einkornlagen, abgetragen werden können.

In Vorversuchen wurde folgende Präparationsmethode entwickelt:

Die in den Stechrohren gefrorenen Kerne wurden über Nacht bei Raumtemperatur aufgetaut. Zur Bearbeitung wurden die Rohre in eine Halterung eingespannt, so daß sie aufrecht standen (Abb.2). Mittels eines Stempels konnte das Sediment jetzt im Kern langsam und in definierten Schritten nach oben gedrückt werden.

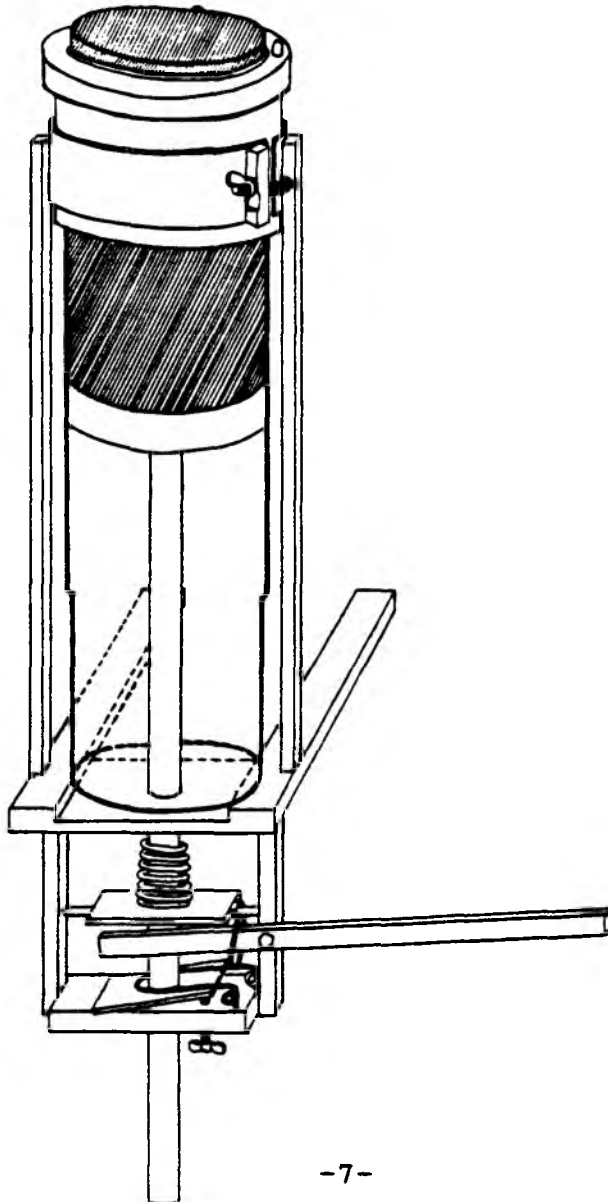


Abb.2
Halterung zur
Präparation von
Sedimentkernen

Durch vorsichtiges Aufdrücken einer Klebefolie (s. A in Abb.3) (Bucheinbindefolie der Fa. Sönnichsen) auf den Kern (B in Abb.3) konnte eine sehr dünne Sedimentlage abgehoben werden. Die Folie mit dem anhaftenden Sediment (C in Abb.3) wurde dann auf schwarzen Fotokarton geklebt (D in Abb.3). Zur Erhöhung der Stabilität der jetzt noch leicht zu beschädigenden Probe wurde der Karton mit einer dünnen PVC-Platte (1 mm) unterlegt.

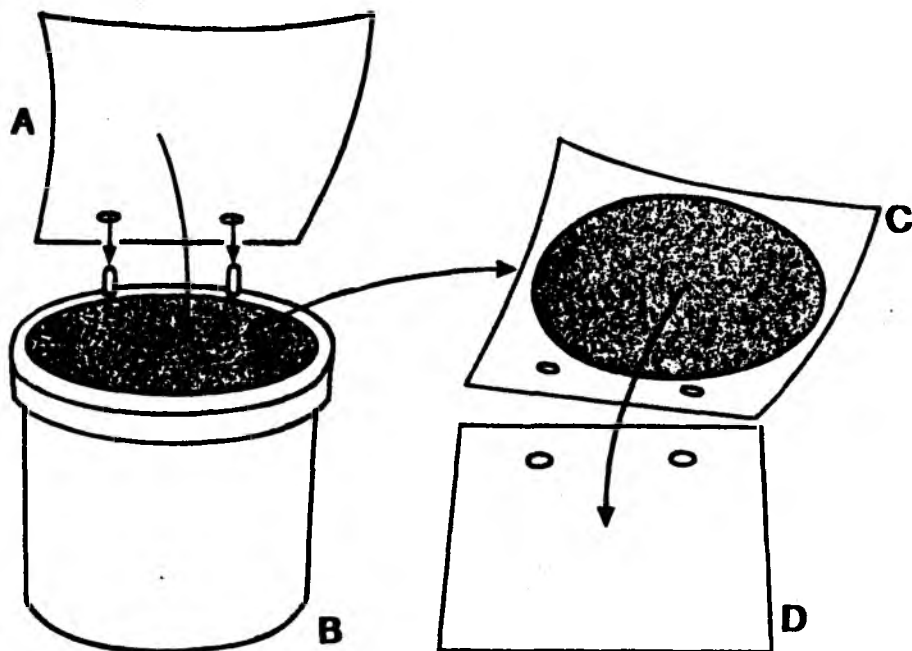


Abb.3 Schema der Präparation der Probenkerne

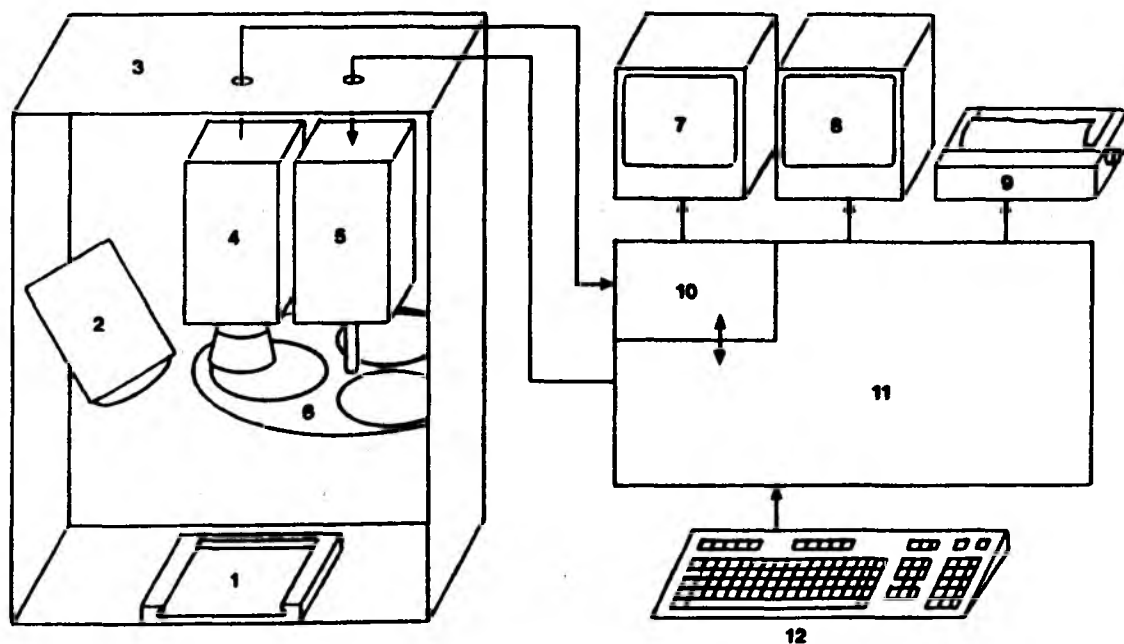
Unter einem Binokular wurde die Dicke der an der Klebefolie haftenden Sedimentschicht bestimmt. Bei sandigen Sedimenten (Kieler Bucht, Hausgartengebiet) war die anhaftende Schicht durchschnittlich 1-3 Körner dick. Gelegentlich traten Flecken mit einer Mächtigkeit von 5-10 Körnern auf, vereinzelte Flecken erreichten eine Stärke von 20 oder mehr Körnern.

Bei feinsandigen Sedimenten mit Schlickanteilen (Deutsche Bucht) lagen durchschnittlich 2-5 Körner übereinander. Gelegentlich traten Flecken mit 10-20 Körnern Mächtigkeit auf, vereinzelte Flecken erreichten eine Stärke von 30 oder mehr Körnern.

Da die Sedimentanhaftung an der Klebefolie auch Lücken aufwies, wurden bei der routinemäßigen Aufarbeitung der Proben jeweils 3 Klebefolien nacheinander genommen. Es wurde dann eine Schicht von 0.5 oder 1 cm Stärke verworfen, worauf die nächste Probennahme mit Klebefolien erfolgte. Die durchschnittliche Dicke der durch drei Klebefolien erfaßten Schicht kann für sandige Sedimente mit 0.4-0.7 mm und für schlickige Sedimente mit 0.3-0.5 mm angenommen werden.

2.5. Systembeschreibung des Luminophorenauswertungssystems (LAUS)

In Zusammenarbeit mit Herrn M.Karben und Herrn L.Menzel von der FA. SIS (Kiel) wurde folgendes über ein Dialogmenü zu bedienende Bilderfassungs- und Auswertesystem konzipiert und gebaut (s.Abb.4):



- | | |
|----------------------|-------------------------------|
| 1 Folihalter | 9 Farbmatrixdrucker |
| 2 UV-Beleuchtung | 10 Image-Processing-Subsystem |
| 3 Lichtschutzgehäuse | 11 AT-kompatibler Rechner |
| 4 CCD-Kamera | 640 KB RAM |
| 5 Antrieb | 2 x 1,2 MB Floppy-Disk |
| 6 Farbfliterrad | 40 MB Harddisk |
| 7 Video-Monitor | 40 MB Streamer |
| 8 Computer-Monitor | 12 Tastatur |

Abb.4 Schemazeichnung des Luminophorenauswertungssystems

Eine Schwarz-Weiß-Videokamera (CCD-Kamera) betrachtet unter UV-Licht die zu untersuchende Probe nacheinander durch drei Farbfilter (blau, rot und grün). Die Bilddaten aus den drei Farbauszügen werden zu einem Gesamtbild zusammengefaßt; dann wird ein vorher aufgenommenes Hintergrundbild abgezogen, um materialbedingte Störfluoreszenzen zu eliminieren. Diese Schritte erfolgen im Image-Processing-Subsystem des Computers und können über den Videomonitor verfolgt werden. Aus dem fertigen Bild ermittelt der Computer die Ortsdaten der einzelnen "Leuchtpunkte". Außerdem werden die drei Farbanteile der "Leuchtpunkte" mit den Farbanteilen bekannter Farben verglichen. Auf diese Weise kann der Computer den "Leuchtpunkten" eine vorher "gelernte" Farbe zuordnen oder sie als unbekannt einstufen. Alle relevanten Bilddaten werden gespeichert, und das Zählergebnis wird auf dem Computermonitor dargestellt.

Nachdem alle Folien eines Kerns vom Computer erfaßt worden sind, kann man sich einzelne Folien (Schichten), beliebige Ausschnitte aus dem Kern oder auch den ganzen Kern bildmäßig darstellen lassen. Es sind zwei- und dreidimensionale Darstellungen möglich. Bei der Darstellung von zwei und mehr Schichten läßt sich das ausgewählte Objekt von sechs Seiten (oben, unten, rechts, links, vorn oder hinten) betrachten. Das Verteilungsbild der Luminophoren im Kern wird auf dem Videomonitor dargestellt, das Zählergebnis auf dem Computermonitor.

Die Verteilungsbilder der Luminophoren lassen sich im Computer speichern, um anschließend in ein Zeichenprogramm eingelesen zu werden. Dort kann eine Interpretation der Luminophorenverteilung erfolgen.

2.6. Bioturbationsversuche

2.6.1. Zeitserie zur Ermittlung der Experimentdauer mit Sedimenten aus der Deutschen Bucht

Bei der ersten routinemäßigen Ausfahrt im Oktober 1988 wurden 12 Stechrohre (20 cm Innendurchmesser) mit einem modifizierten Großkastengreifer (Forster 1991) von der Station "Schlicksandgrund" entnommen und bei in situ Temperatur in eine Laborhälterungsanlage gebracht. Dort wurde auf jedem Kern eine markierte Fläche von 78.54 cm² (entspricht Stechrohr mit 10 cm Innendurchmesser) mit einer Mischung aus 0.3 g roten und je 0.6 g gelben und grünen Luminophoren bestreut. Die Zeitserie lief vom 28.10. bis zum 23.11.88. Am 30.10., 03.11., 07.11. und 23.11. wurden aus je drei Kernen die markierten Bereiche ausgestochen und die Bioturbation durch Einfrieren gestoppt.

2.6.2. Jahresgang der Bioturbationsleistung in der Deutschen Bucht

In diesem Langzeitexperiment sollte untersucht werden, ob die Lebensgemeinschaften auf den Stationen "Schlicksandgrund" und "Schlickgrund" in der Nordsee eine im Jahresgang variierende Bioturbationsleistung erbringen. Dazu wurden in der Zeit von Oktober 1988 bis Oktober 1989 auf fünf Ausfahrten (etwa vierteljährlich) je drei Stechrohre (20 cm Innendurchmesser) von der Station "Schlicksandgrund" genommen. Auf der Station "Schlickgrund" konnten nur bei drei Terminen (Februar bis August 1989) Proben genommen werden. Die Proben wurden wie in 2.6.1. beschrieben präpariert. Nach 10 Tagen Hälterung bei in situ Temperatur wurde der markierte Bereich mit einem Stechrohr (Innendurchmesser 10 cm) ausgestochen und dann eingefroren. Die Proben wurden bis zur endgültigen Bearbeitung tiefgekühlt gelagert (-18°C) .

2.6.3. Simulation einer Sauerstoffmangelsituation

In diesem Experiment sollte im Oktober 1989 untersucht werden, wie sich eine Sauerstoffmangelsituation auf die Bioturbationsleistung der Lebensgemeinschaft auswirkt.

Zum einen wurde die Bioturbation in hypoxischen mit der in oxischen Versuchskernen verglichen, und zum anderen wurde die Reaktion auf den erneuten Anstieg der O_2 -Sättigung (Regeneration) beobachtet. Für das Experiment wurden im Labor in Durchflußsystemen drei Sedimentkerne (10 cm Innendurchmesser) von der Station "Schlicksandgrund" unter oxischen Bedingungen (mindestens 90% O_2 -Sättigung) gehalten. Bei sechs weiteren Kernen (10 cm Innendurchmesser) wurde die O_2 -Sättigung in einem zweiten Durchflußsystem auf 30% reduziert.

Zu Beginn des Experiments wurde auf die drei oxischen und auf drei hypoxische Kerne eine Mischung aus 0.3 g roten und je 0.6 g gelben und grünen Luminophoren gestreut. Beendet wurde dieser Teil des Experiments, indem die Kerne nach 12 Tagen eingefroren wurden. Zu diesem Zeitpunkt wurden die anderen drei seit Experimentbeginn hypoxischen Kerne mit der Luminophorenmischung bestreut und mit O_2 -gesättigtem Wasser versorgt. Sie durchliefen eine Regenerationsphase.

2.6.4. In situ Experiment in der Kieler Bucht

Das in situ Experiment fand im Sommer 1988 im "Hausgartengebiet" am Ausgang der Eckernförder Bucht in 15 m Wassertiefe statt.

In der Nähe einer Markierungstonne (Süd-West-Ecke) wurde küsten-parallel eine Such- und Markierungsleine gespannt. Längs der Leine wurden 6 Versuchsfelder eingerichtet. Für jedes Versuchsfeld wurden drei Rohre (20 cm Länge, 11 cm Innendurchmesser) ins Sediment getrieben, bis sie gerade noch erkennbar waren. Anschließend wurden die Flächen in den Rohren mit einer Mischung aus je 1 g blauen, roten und gelben und 0.25 g grünen Luminophoren bestreut.

An jedem Probennahmetag wurde ein Versuchsfeld "aufgelöst", indem die Fläche innerhalb eines Rohres mit einem genau passenden Stechrohr ausgestochen wurde. Im Labor wurden die Proben bis zur endgültigen Bearbeitung eingefroren.

2.6.5. Temperaturabhängigkeit der Bioturbationsleistung von *Nereis diversicolor*

Für dieses Experiment (durchgeführt in Zusammenarbeit mit H. Blackburn, Aarhus und E. Kristensen, Odense) wurde ein sandiges Flachwassersediment aus dem Odensefjord (Insel Fünen, Dänemark) durch Aussieben weitgehend von Makrofauna und Algenstücken befreit und etwa 15 cm hoch in Rohre (10 cm Innendurchmesser) gefüllt. Das Sediment bestand aus folgenden Korngrößenfraktionen: >1000 µm: 0.3%, 500-1000 µm: 3.8%, 250-500 µm: 26.9%, 125-250 µm: 60.6%, 63-125 µm: 6.5% und <63 µm: 1.9% (E.Christensen, pers.Mitteilung). Nach dem Transport ins Labor (14.02.90) wurden die Kerne mit Wasser aus dem Probenahmegebiet überschichtet. Nach einer Ruhepause von 5 Tagen und einer Einstellung der Proben auf die Temperaturstufen 4°, 8° und 16°C wurden am 19.02.1990 in jeden Kern 9 *Nereis diversicolor* eingesetzt (vergl. Kitlar 1991). Die Tiere bekamen eine Eingewöhnungszeit von 7 Tagen; dann (26.02.90) wurde jeder Kern mit 4,5 g fein zerkleinerten Rotalgen (Feuchtgewicht) "gefüttert". Gleichzeitig wurde pro Kern eine Mischung aus 0.2 g blauen, 0.15 g roten und 0.1 g gelben Luminophoren zugegeben.

Bei jeder Probennahme wurden je 3 Kerne aus den verschiedenen Temperaturbereichen entnommen und eingefroren.

3. Ergebnis

3.1. Sedimentparameter

3.1.1. Wassergehalt des Sediments

Die Wassergehaltsmessungen im Zeitraum von April 1988 bis August 1989 ergaben auf der Station "Schlicksgrund" für die beprobte Schicht (0-15 cm, gemessen in 1 cm-Schichten) mit Ausnahme der Daten vom September 1988 ein sehr einheitliches Bild. Im obersten Horizont (0-1 cm) variierte der Wasseranteil am Feuchtgewicht (FG) zwischen 26 und 37 %; aber schon im nächsten Horizont (1-2 cm) stabilisierte sich der Wassergehalt auf 25-26% FG und nahm dann bis in 15 cm Tiefe auf 23.5% ab. Im September 1988 war von der Oberfläche bis in 3 cm Tiefe eine Erhöhung des Wassergehalts festzustellen. Der Oberflächenwert betrug 44.3% FG (s.Abb.5). Die Auswertung der Rumohrlot-Proben (s.Abb.6) zeigte ein ähnliches Bild wie die Proben aus den Kastengreifern. Hier lag der Oberflächenwert des Wassergehalts bei 33% FG. Der Wassergehalt sank auf etwa 24% in 15 cm Tiefe und ging weiter zurück auf 23% am Kernende. Bei der Station "Schlickgrund" variierte der Wassergehalt an der Sedimentoberfläche zwischen 50 und 80 % FG (s.Abb.7). Im Zeitraum April, Juni und September 1988 sowie im Zeitraum Februar, Mai und August 1989 war jeweils eine Zunahme des Wassergehalts in der Oberflächenschicht 0-1 cm zu erkennen. Dieses, einen Jahresgang andeutende Resultat, verlor sich aber schon bei einer Tiefe von 1-2 cm. Über die gesamte Zeit schwankten die Wassergehalte in der Tiefe; zum Teil wurden auch höhere Wassergehalte als an der Oberfläche erreicht (s.Anhang A, Tab.1). Vergleicht man die oberflächennahen (0-1 cm) Wassergehalte (50-80%) mit den Wassergehalten in 14-15 cm Tiefe (41-56%), so ergibt sich auch für die Station "Schlickgrund" eine Abnahme des Wassergehalts in der Tiefe. Die Daten aus den Rumohrlot-Proben (Abb.8) belegen diesen variablen Kurvenverlauf bis in eine Tiefe von über 44 cm.

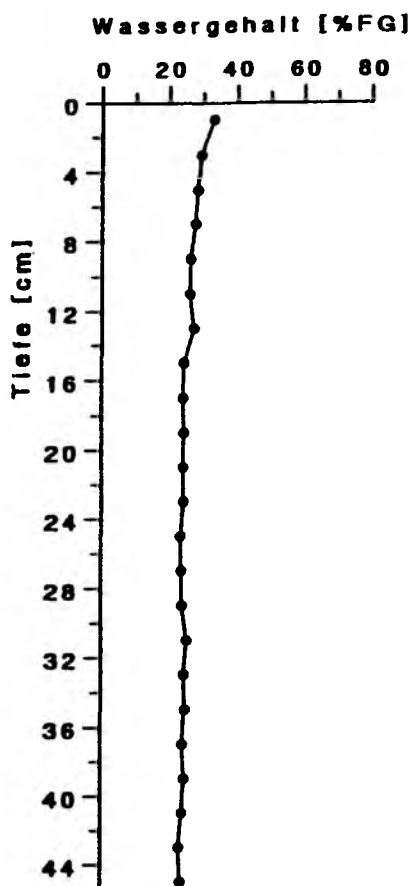
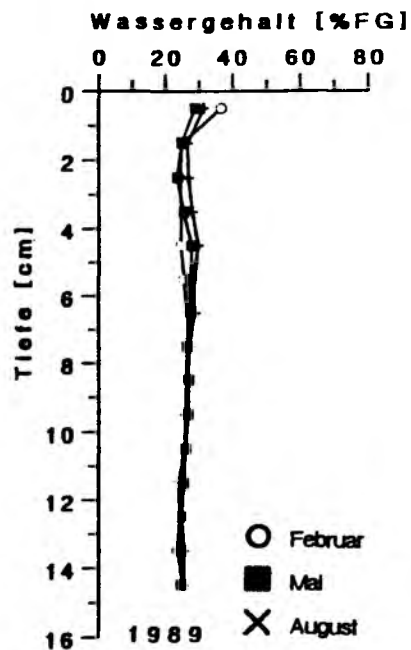
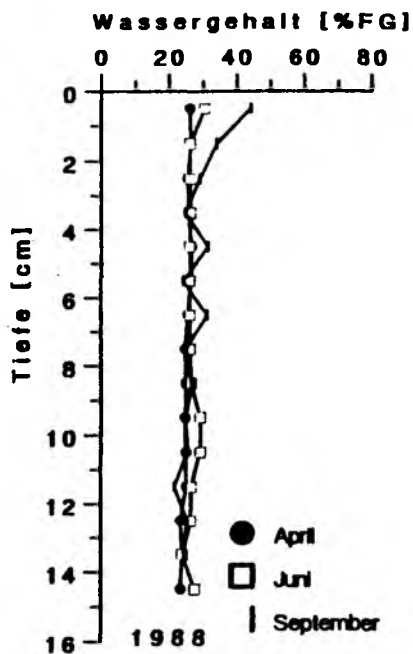


Abb.5 (oben) Wassergehalte des Sediments auf der Station Schlicksandgrund in den Jahren 1988 und 1989

Abb.6 (links) Wassergehalte des Sediments auf der Station Schlicksandgrund im Oktober 1989 gemessen in einem Rumohrlot-Kern

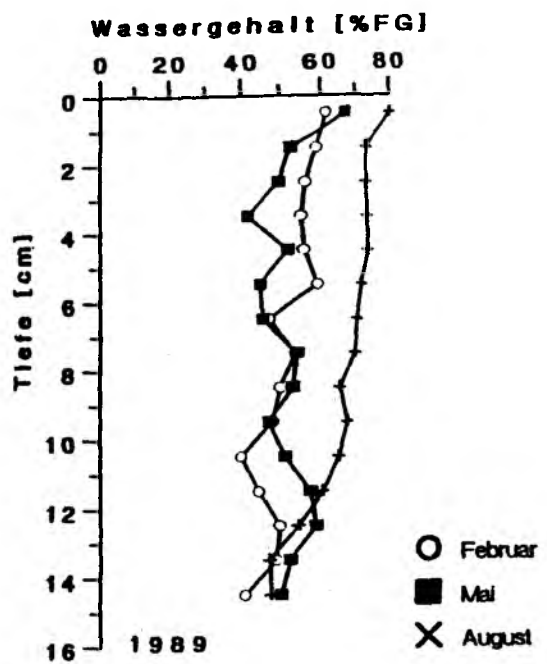
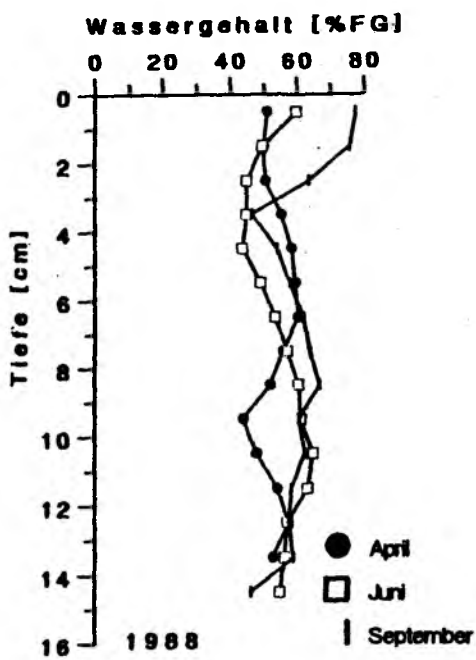
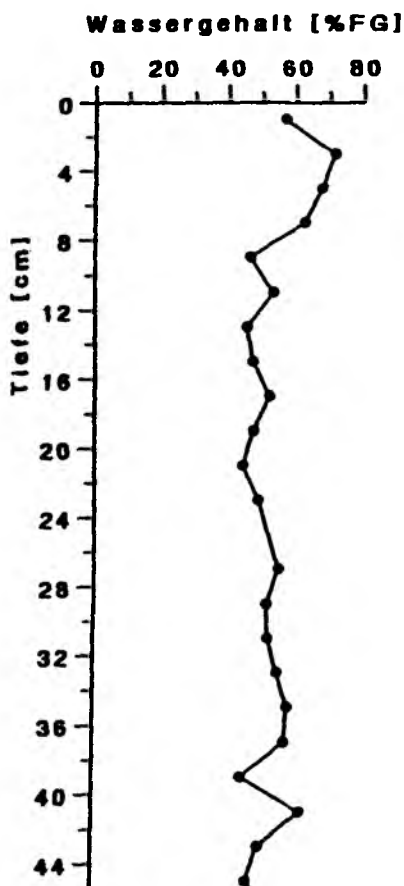


Abb.7 (oben) Wassergehalte des Sediments auf der Station Schlickgrund in den Jahren 1988 und 1989

Abb.8 (links) Wassergehalte des Sediments auf der Station Schlickgrund im Oktober 1989 gemessen in einem Rumohrlot-Kern



3.1.2. Kohlenstoffgehalt (Glühverlustbestimmung) des Sediments

Ein ähnlicher Kurvenverlauf wie beim Wassergehalt zeigte sich auch beim Kohlenstoffgehalt (s.Abb.9). An fast allen Terminen lagen die Werte auf der Station "Schlicksandgrund" zwischen 11 und 14 mg cm⁻³ an der Oberfläche. Eine Ausnahme bildeten die Proben vom September 1988; hier war der Kohlenstoffgehalt um den Faktor 3 höher, aber nicht signifikant (s.Anhang A, Tab.2). Tendenziell nahmen die Kohlenstoffgehalte in der Tiefe leicht zu; sie stiegen auf Werte um 15 mg cm⁻³ an. Auch bei an Rumohrlot-Proben im Oktober 1989 gemessenen Kohlenstoffgehalten ließ sich ein leichter Anstieg von der Oberfläche bis in 19 cm Tiefe (ohne Berücksichtigung der Abnahme im Bereich 13-15 cm) feststellen. Danach begann eine langsame Abnahme bis zu Kernende.

Auf der Station "Schlickgrund" waren die Kohlenstoffgehalte um den Faktor 1-1.5 höher und konnten mit 15-22 mg cm⁻³ angegeben werden (s.Abb.11). Bis in 6 cm Tiefe deutete sich ein leichter Anstieg der Kohlenstoffgehalte an; auf Grund der Standardabweichungen (s.Anhang A, Tab.2) ist dieser Anstieg aber nicht signifikant. Wie schon bei der Station "Schlicksandgrund" ließ sich auch auf der Station "Schlickgrund" erst ein leichter Anstieg bis in 19 cm Tiefe (ohne Berücksichtigung der Abnahme im Bereich 13-15 cm) feststellen. Danach war eine langsame Abnahme bis zum Kernende zu beobachten (Abb.12). Auffällig war auch das in beiden Rumohrlot-Profilen (Schlicksandgrund und Schlickgrund) erscheinende zweite Minimum im Kohlenstoffgehalt bei etwa 30 cm Tiefe.

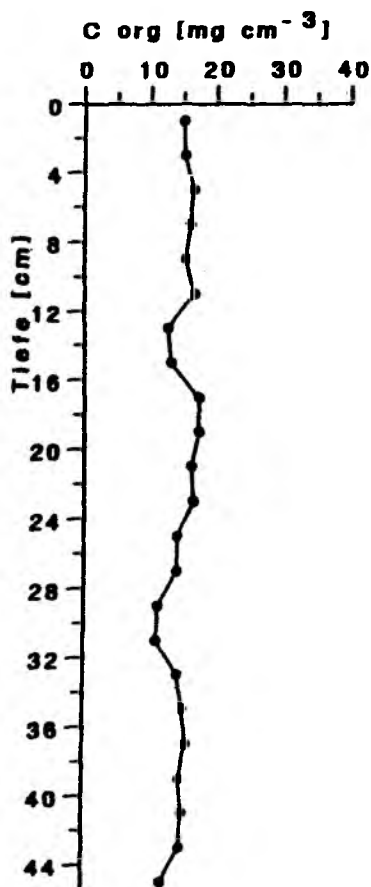
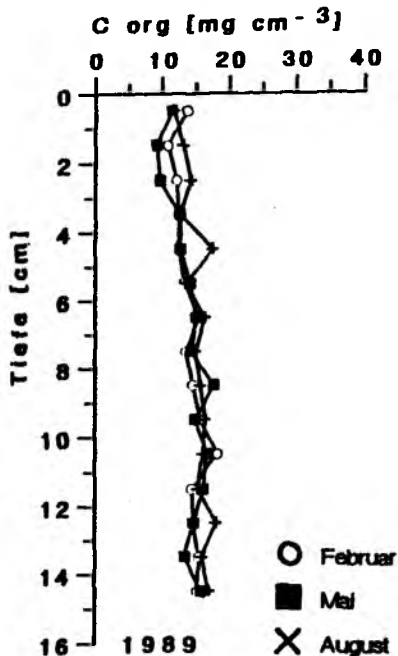
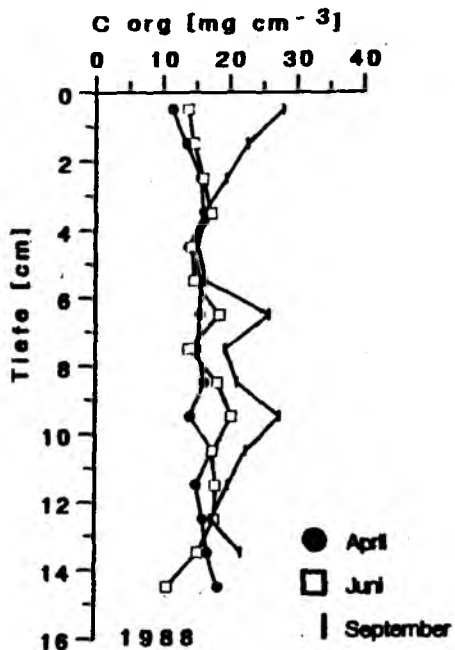


Abb.9 (oben) Gehalt an organischem Kohlenstoff im Sediment der Station Schlicksandgrund in den Jahren 1988 und 1989

Abb.10 (links) Gehalt an organischem Kohlenstoff im Sediment der Station Schlicksandgrund im Oktober 1989 gemessen in einem Rumohrlot-Kern

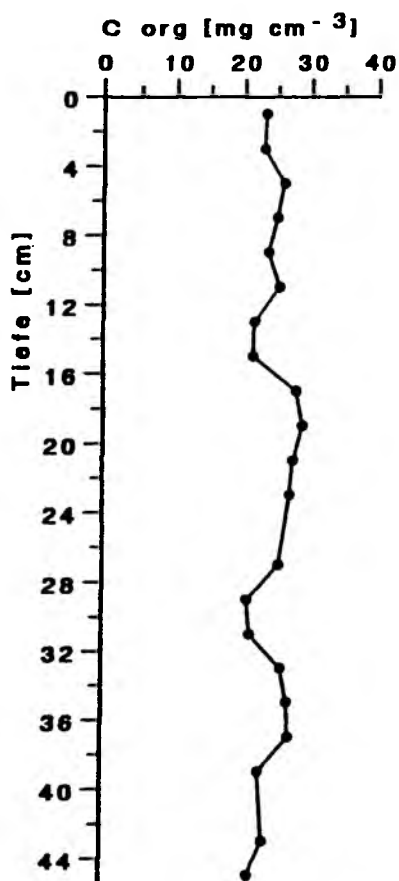
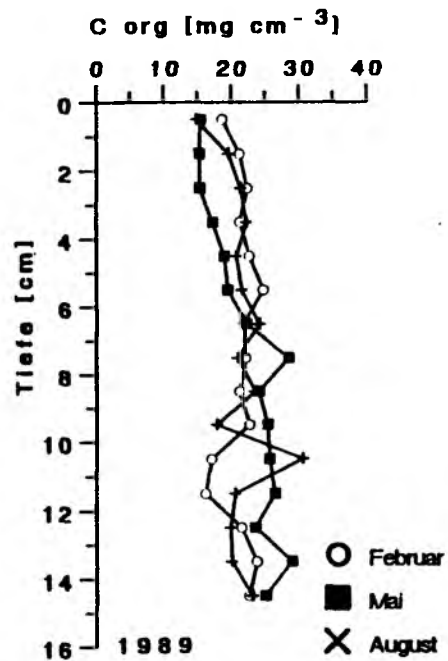
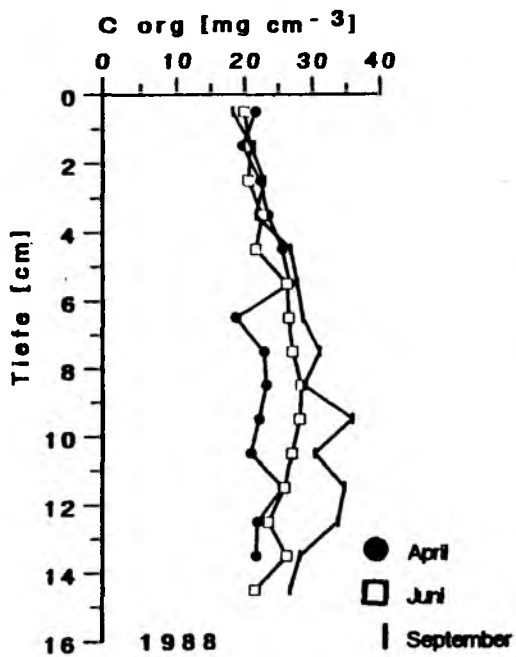


Abb.11 (oben) Gehalt an organischem Kohlenstoff im Sediment der Station Schlickgrund in den Jahren 1988 und 1989

Abb.12 (links) Gehalt an organischem Kohlenstoff im Sediment der Station Schlickgrund im Oktober 1989 gemessen in einem Rumohrplot-Kern

3.1.3. Proteingehalt des Sediments

Wie schon der vorhergehend beschriebene Parameter "Kohlenstoff" ist auch das "Protein", bedingt durch die Anteile an schwerabbaubaren Substanzen (z.B. Huminsäuren), ein konservativer Parameter. Beim Protein war die Tiefenverteilung zu allen beprobten Zeiten sehr gleichmäßig (s.Abb.13). Ein Gradient über die Tiefe war auf Grund der Standardabweichungen nicht erkennbar (s.Anhang A, Tab.3). Erkennbar war aber eine Abnahme des Proteingehalts vom Winter/Frühjahr ($4-7 \text{ mg cm}^{-3}$) zum Sommer hin ($1-2 \text{ mg cm}^{-3}$). Im Herbst stieg der Proteingehalt dann wieder.

Die Auswertung der Rumohrlot-Proben vom Oktober 1989 bestätigte den konservativen Charakter des Parameters "Protein" (s.Abb.14). Die Werte schwankten im Bereich von $1.8-3.8 \text{ mg cm}^{-3}$ (s.Anhang A, Tab.5). Dies dürfte aber im Bereich der zu erwartenden Standardabweichungen (Anhang A, Tab.3) ohne Bedeutung sein.

Auf der Station Schlickgrund war die Situation ähnlich wie auf der Station Schlicksandgrund. Es ließ sich wieder eine Abnahme des Proteingehalts vom Winter/Frühjahr ($13-21 \text{ mg cm}^{-3}$) zum Sommer ($7-9 \text{ mg cm}^{-3}$) und ein Anstieg auf etwa 4 mg cm^{-3} im September 1988 erkennen (s.Abb.15). Ferner deutete sich auf der Station Schlickgrund eine Erhöhung der Konzentration des Proteins in der Tiefe an, aber unter Berücksichtigung der Standardabweichung (s.Anhang A, Tab.3) ließen sich keine signifikanten Änderungen belegen. Aus den Rumohrlot-Proben ließ sich diese Erhöhung aber nicht be-

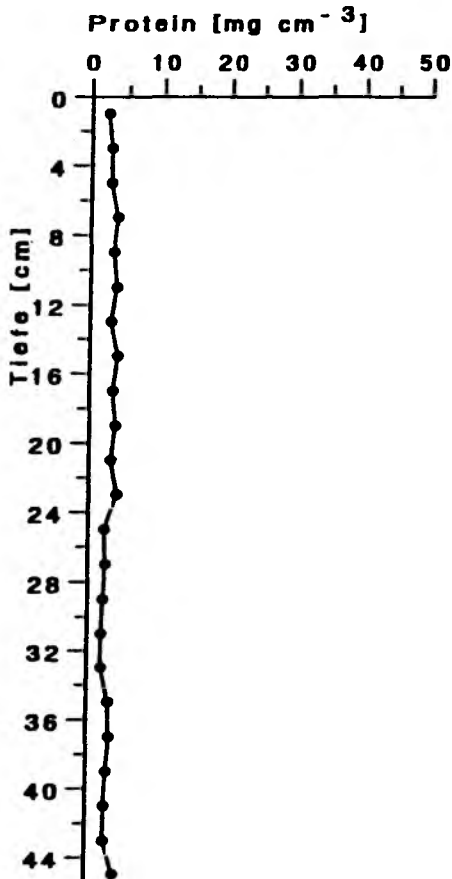
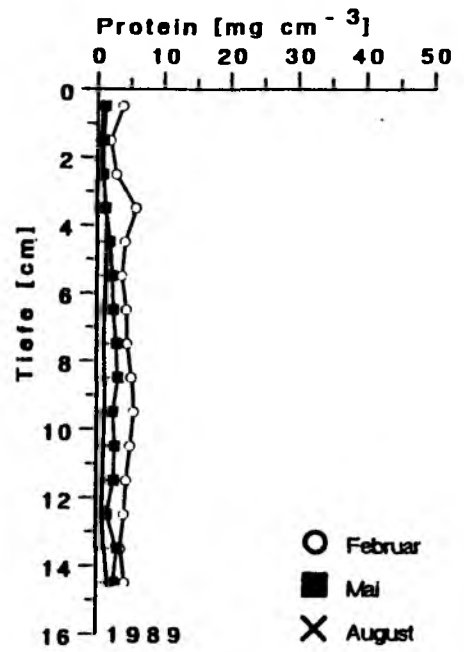
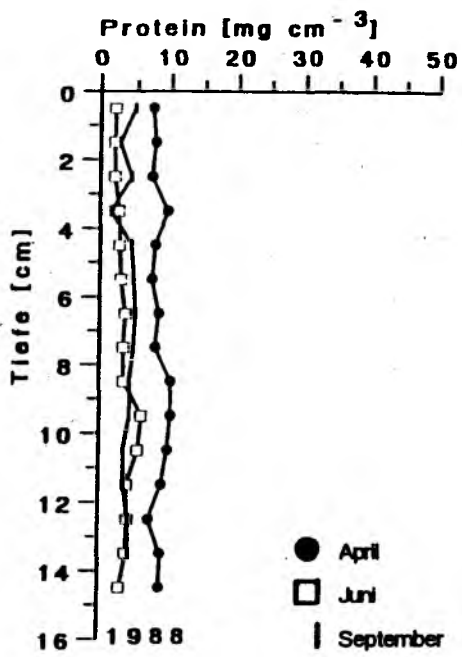


Abb.13 (oben) Gehalt an "Protein" im Sediment der Station Schlicksandgrund in den Jahren 1988 und 1989

Abb.14 (links) Gehalt an "Protein" im Sediment der Station Schlicksandgrund im Oktober 1989 gemessen in einem Rührlot-Kern

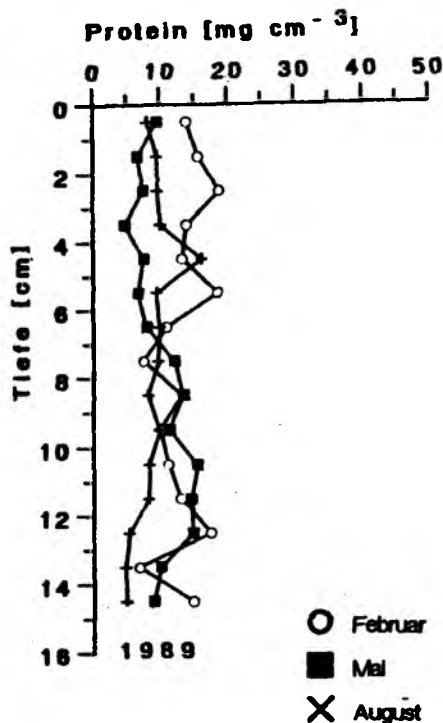
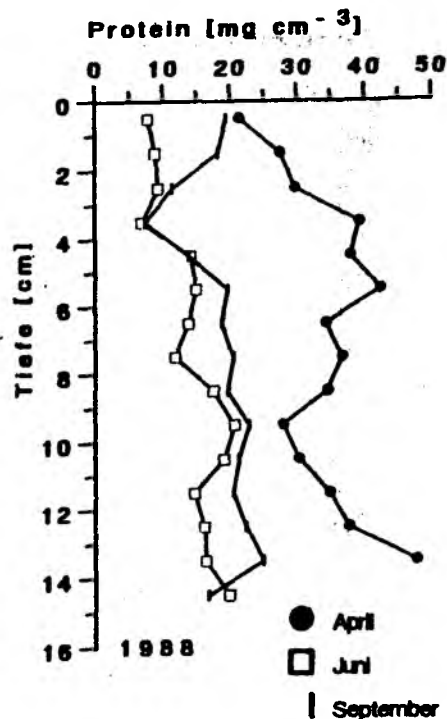


Abb.15 (oben) Gehalt an "Protein" im Sediment der Station Schlickgrund in den Jahren 1988 und 1989

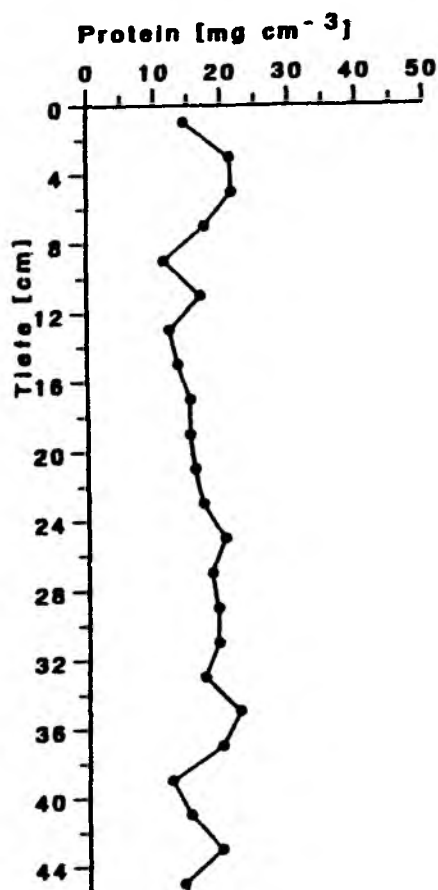


Abb.16 (links) Gehalt an "Protein" im Sediment der Station Schlickgrund im Oktober 1989 gemessen in einem Rumpfrlot-Kern

3.1.4. Chlorophyll-a-Gehalt des Sediments

Auf der Station Schlicksandgrund schien, wenn man die 7 Meßpunkte von April 1988 bis Oktober 1989 unter Berücksichtigung der Standardabweichungen (Anhang A, Tab.4 u. Tab.5) zu Grunde legt, der Chlorophyll-a-Gehalt über die Zeit gleichbleibend zu sein. In den oberen 4 cm des Sediments lagen die Chlorophyll-a-Gehalte zwischen 30 und 102 mg m⁻². Von 4-15 cm Tiefe wurden die Schwankungen geringer, und die Chlorophyll-a-Gehalte nahmen auf 26-32 mg m⁻² ab (s.Abb.17).

In den Rumohrlot-Proben vom Oktober 1989 zeigte sich dann in etwa 22 cm Tiefe noch einmal eine deutliche Abnahme des Chlorophyll-a-Gehalts auf 18 mg m⁻². Diese Abnahme setzte sich weiter bis auf 4 mg m⁻² am Kernende fort (s.Abb.18).

Auf der Station Schlickgrund ergaben die Chlorophyll-a-Verteilungskurven aus dem Untersuchungszeitraum ein deutlich komplizierteres Bild.

Die Chlorophyll-a-Gehalte in der Schicht 0-1 cm schwankten zwischen 66 und 460 mg m⁻²; die Standardabweichungen betrugen mehr als 30% des Meßwertes (Anhang A, Tab.4). Im Bereich zwischen 4 und 12 cm Tiefe ließ sich bei allen Terminen ein maximaler Chlorophyll-a-Gehalt erkennen (Abb.19). Mit zunehmender Tiefe sanken die Werte dann aber ab.

Die Auswertung der Rumohrlot-Proben (Abb.20) bestätigte dieses Phänomen. Der Oberflächenwert von 121 mg m⁻² stieg bis auf 210 mg m⁻² in 11 cm Tiefe und fiel dann bis auf 45 mg m⁻² in 44 cm Tiefe.

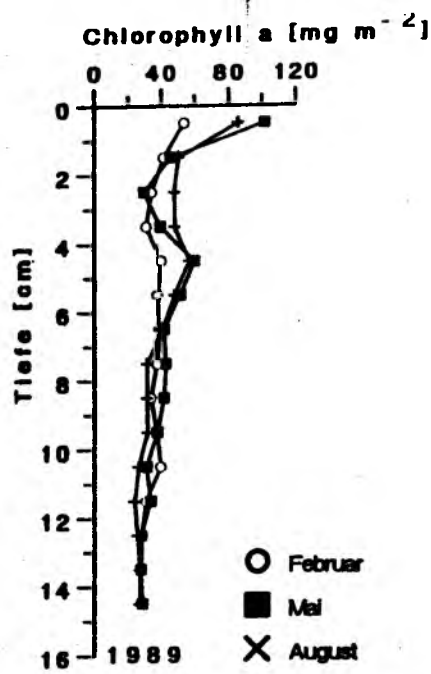
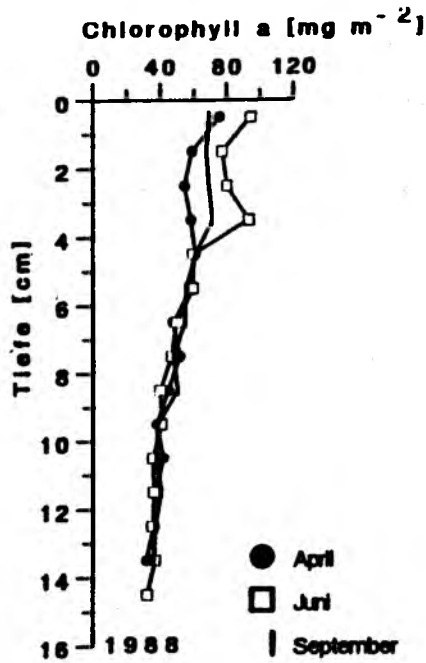


Abb.17 (oben) Chlorophyll-a-Gehalt des Sediments der Station Schlicksandgrund in den Jahren 1988 und 1989

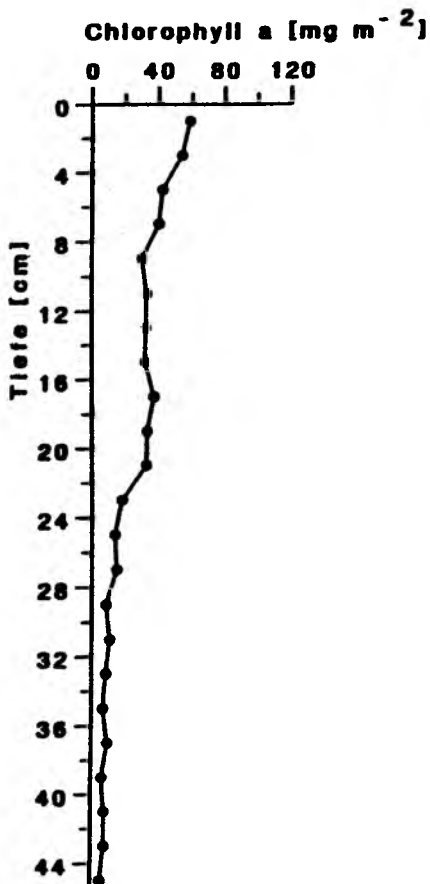


Abb.18 (links) Chlorophyll-a-Gehalt des Sediments der Station Schlicksandgrund im Oktober 1989 gemessen in einem Rummohrloot-Kern

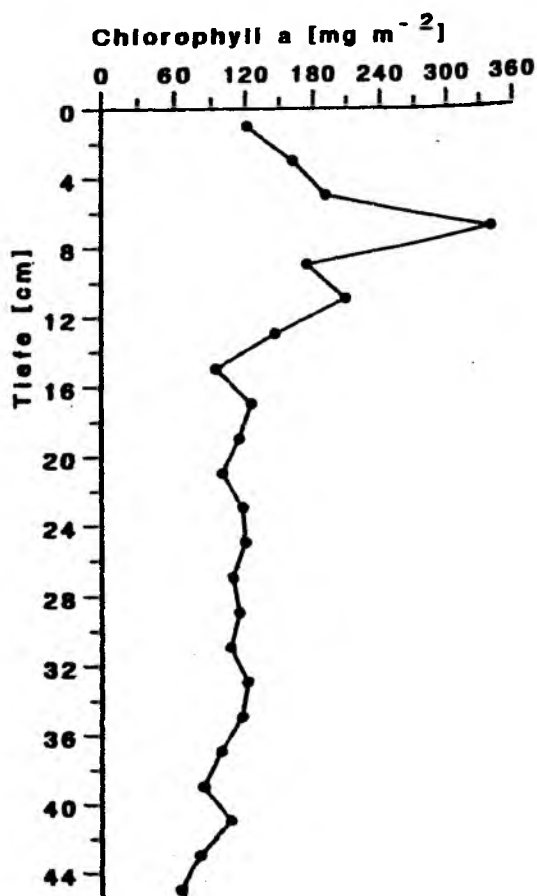
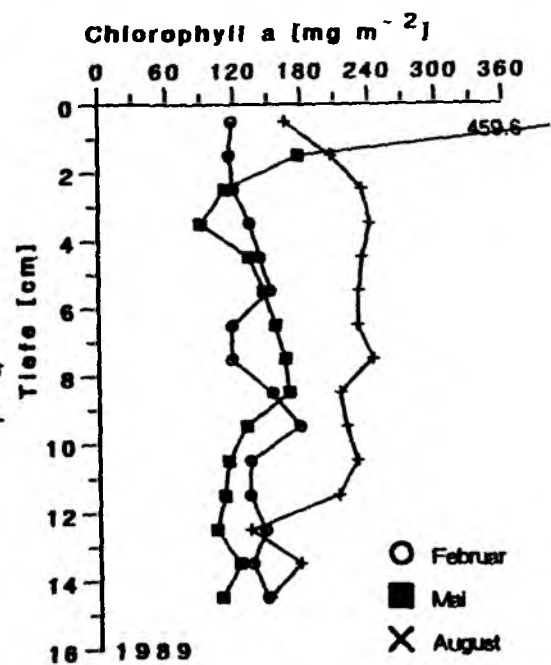
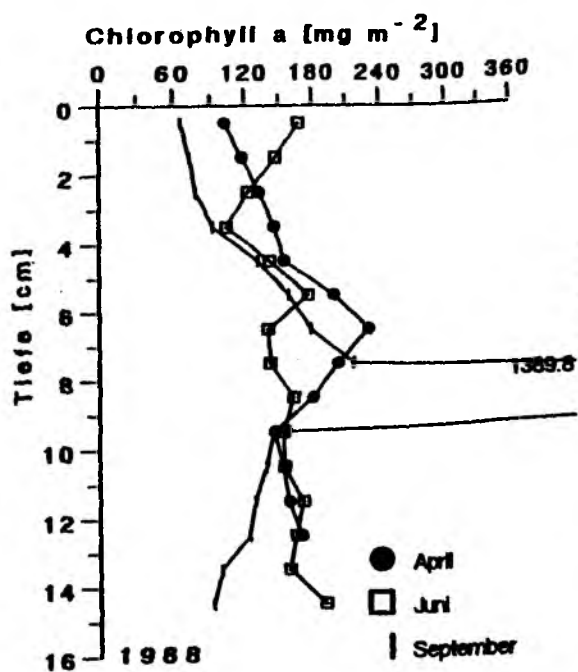


Abb.19 (oben) Chlorophyll-a-Gehalt des Sediments der Station Schlickgrund in den Jahren 1988 und 1989

Abb.20 (links) Chlorophyll-a-Gehalt des Sediments der Station Schlickgrund im Oktober 1989 gemessen in einem Rummohr-Kern

3.2. System- und Methodentests

Nachdem eine arbeitstechnisch praktikable Lösung zur Präparation der Probenkerne gefunden war, mußte festgestellt werden, ob das LAUS gleiche Ergebnisse liefert wie Vergleichszählungen mit dem Auge. Dabei stellte sich heraus, daß die Systemkomponenten Videokamera und Image-Processing-Subsystem des LAUS 1.5 bis 2 Stunden Vorlaufzeit brauchen, um einen stabilen Zustand zu erreichen und damit reproduzierbare Ergebnisse zu liefern.

3.2.1. Vergleich zwischen Augen- und Maschinenzählung

In diesem Test wurden einzelne Folien mit verschiedenen Sedimenttypen erst von dem LAUS und dann per Auge gezählt. Es sollte festgestellt werden, ob die Maschinenzählung den Luminophorengehalt einer Probe über- oder unterschätzt, um gegebenenfalls einen Korrekturfaktor zu ermitteln.

Die Vergleichszählungen einzelner Folien zwischen Auge und LAUS ergaben zum Teil deutliche, von der Sedimentbeschaffenheit abhängige Unterschiede.

Von den blauen Luminophoren (500-1000 μm) "erkannte" die Maschine bei sandigen Sedimenten 40%, bei schlickigen Sedimenten bis zu 2000% der wirklich vorhandenen markierten Partikel. Dies kann zum einen dadurch geschehen, daß große Luminophoren auf ihrer Oberfläche mehrere Fluoreszenzmaxima haben; diese sind für die Festlegung der Ortskoordinaten ausschlaggebend. Zum anderen bewirken unebene Oberflächen eine Vortäuschung von blauen Luminophoren.

Bei den kleineren Luminophoren Rot (250-500 μm), Gelb (125-250 μm) und Grün (63-125 μm) war die Erkennung wenig oder gar nicht vom Sediment abhängig. Von der Farbe Rot wurden 50%, von Gelb 15-20% und von Grün 20% der Luminophoren erkannt.

Im folgenden sind alle vom LAUS ermittelten Werte um einen dem Sediment entsprechenden Korrekturfaktor berichtigt und (mit Ausnahme der grünen Luminophoren) auf die zugegebene Anzahl von Luminophoren hochgerechnet.

3.2.2. Test der Präparationsmethode

Um zu zeigen, ob die in Kapitel 2.4. beschriebene Präparationsmethode die Luminophorenverteilung über die Sedimenttiefe wirklichkeitgetreu wiedergibt, wurden die Ergebnisse der Folienzählungen (sowohl LAUS- als auch Augenzählung) mit dem Luminophorengehalt der normalerweise verworfenen Zwischenschichten verglichen.

Dieser Vergleich wurde für die Luminophorenfarben Blau (500-1000 μm), Rot (250-500 μm) und Gelb (125-250 μm) mit Proben aus dem Experiment 2.6.5. durchgeführt.

Für die Farben (Größenklassen) Rot und Gelb zeigt die Abb. 21 im Rahmen der Standardabweichungen (Anhang B, Tab.1) der einzelnen Meßpunkte eine sehr gute Übereinstimmung der drei Verteilungskurven.

Für die Farbe Blau gibt es in der Schicht 0-1 cm eine deutliche Abweichung (die Standardabweichungen überschneiden sich nicht). In der Tiefe sind die Abweichungen zwar noch deutlich, aber die Standardabweichungen überschneiden sich.

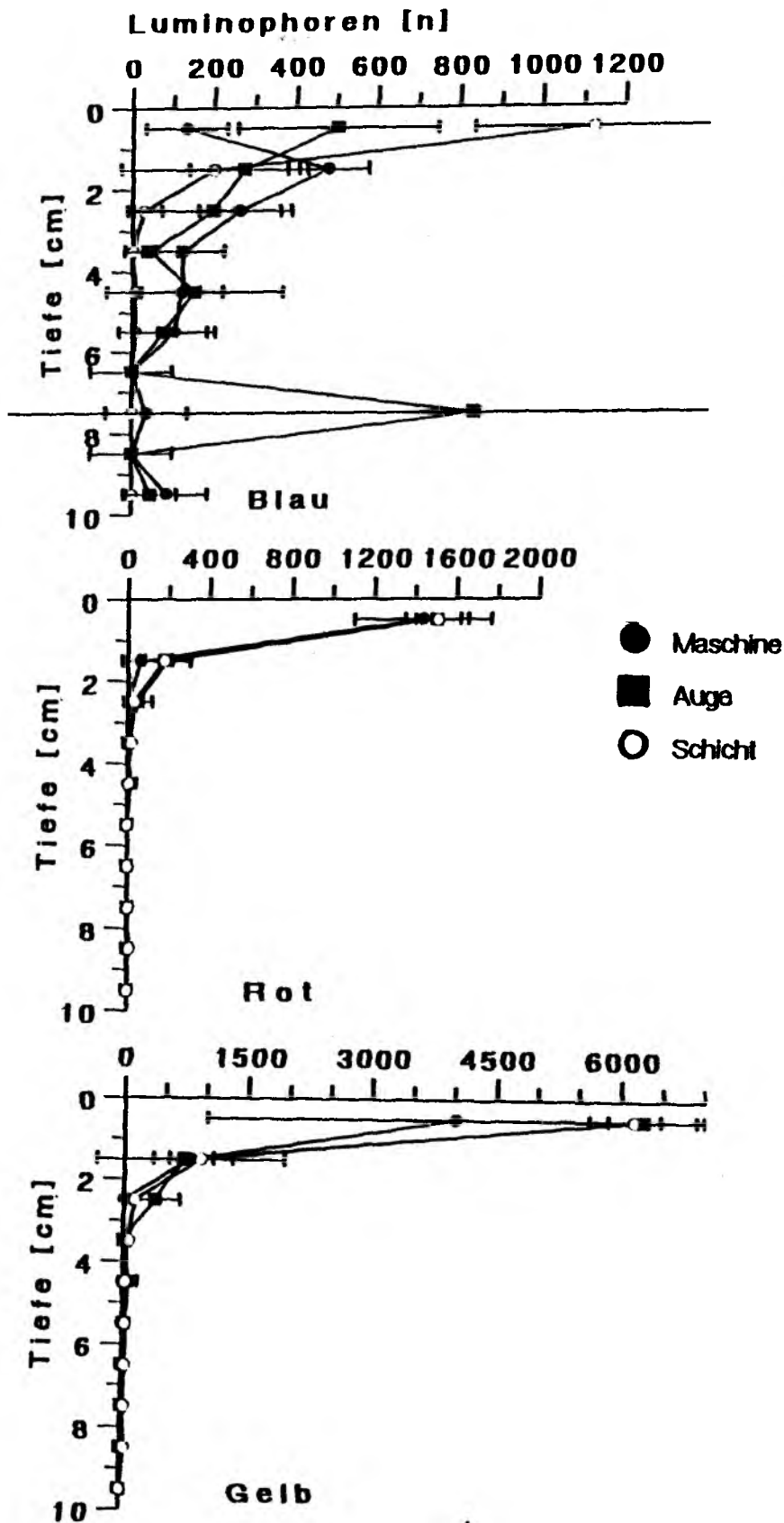


Abb.21 Im Test der Präparationsmethode wurde der Luminophorengehalt der normalerweise verworfenen Zwischenschichten mit den korrigierten und auf die Zugabe hochgerechneten Folienwerten (Augen- und Maschinenzählung) verglichen.

3.3. Bioturbationsversuche

Zu einer besseren Beurteilung der Luminophorenverteilungskurven und einer anschließenden Ratenberechnung wurde zuerst für alle drei untersuchten Sedimenttypen (Nordsee, Station Schlicksandgrund; Kieler Bucht, Hausgarten; Odensefjord) die Korngrößenverteilung ermittelt. Dann wurden die Gewichte der einzelnen Fraktionen im obersten Millimeter des Sediment (jeweils in einem Stechrohr mit 10 cm Innendurchmesser) ermittelt, um den Anteil an markierten Partikeln pro Größenklasse zu bestimmen (s. Tab.2).

Tab.2 Beschaffenheit der drei in Experimenten bearbeiteten Sedimenttypen

*) diese Werte sind entsprechend den Annahmen aus Tab.1 errechnet

Deutsche Bucht, Station Schlicksandgrund

Größen- klasse	Anteil	Sediment		Luminophore		markierter
	am	Gewicht	Körner	Gewicht		Anteil
	Sediment					
	[%]	[g]	[n]	[g]	[n]	[%]
>1000 µm	--	--	---	---	---	--
500-1000 µm	0.7	0.06	10	---	---	--
250- 500 µm	5.5	0.50	7350	0.3	4410	38
125- 250 µm	52.0	4.68	483912	0.6	62040	11
63- 125 µm	19.3	1.74	---	0.6	408000*	26
<63 µm	21.8	1.96	---			

Kieler Bucht, Hausgarten

Größen- klasse	Anteil	Sediment		Luminophore		markierte:
	am	Gewicht	Körner	Gewicht		Anteil
	Sediment					
	[%]	[g]	[n]	[g]	[n]	[%]
>1000 µm	3.1	--	---	---	---	--
500-1000 µm	15.5	1.81	3307	1	1827	36
250- 500 µm	25.4	2.97	43656	1	14699	25
125- 250 µm	51.7	6.05	625570	1	103400	14
63- 125 µm	4.4	0.51	---	0.25	170000*	26
<63 µm	---	---	---			

Größen- klasse	Anteil am Sediment	Sediment Gewicht	Körner [n]	Luminophore Gewicht	markierter Anteil
	[%]	[g]	[n]	[g] [n]	[%]
>1000 μm	0.3	---	---	---	---
500-1000 μm	3.8	0.4	730	0.2 365	33
250- 500 μm	26.9	2.8	41157	0.15 2205	5
125- 250 μm	60.6	6.4	661760	0.1 10340	1.5
63- 125 μm	6.5	0.7	---	---	---
<63 μm	1.9	0.2	---		

Auf der Basis der ermittelten Korngrößenverteilung wurde bei den Untersuchungen an Proben aus der Deutschen Bucht der Bereich 63-500 μm betrachtet; beim in situ Experiment in der Kieler Bucht und beim Temperaturexperiment wurde der zu untersuchende Bereich auf 63-1000 μm ausgedehnt.

3.3.1. Zeitserie zur Ermittlung der Experimentdauer mit Sedimenten aus der Deutschen Bucht

Zur Ermittlung der Hälterungszeit im Labor wurden 12 Kerne mit Luminophoren versehen. Nach 2, 5, 9 und 25 Tagen wurde die Bioturbation in je 3 Kernen durch Einfrieren gestoppt.

Bei allen 3 Farben (Größenklassen) ließ sich mit diesem Versuch keine optimale Experimentdauer ermitteln.

Die roten Luminophoren (250-500 μm) waren selbst nach 25 Tagen Experimentdauer nur bis 1.5 cm Tiefe eingearbeitet (s. Abb. 22 u. Anhang C, Tab. 1). Eine zeitliche Änderung der Luminophorenkonzentration im obersten halben Zentimeter ließ sich auf Grund der zum Teil sehr hohen Standardabweichungen (z.T. größer als der Mittelwert; s. Anhang C, Tab. 1) nicht erkennen.

Die gelben Luminophoren (125-250 μm) erreichten schon nach 2 Tagen die maximale Eindringtiefe von 8-9 cm. Danach verringerte sich die Eindringtiefe wieder und erreichte nach 25 Tagen nur noch 4-5 cm. Dabei fiel auf, daß bei allen Ergebnissen unterhalb des 0.5 cm-Horizonts die Standardabweichungen größer als die Mittelwerte

waren; d.h. nur in einem von 3 Kernen wurden Luminophoren in der entsprechenden Tiefe gefunden. Auch hier war eine zeitliche Änderung der Luminophorenkonzentration im obersten halben Zentimeter wegen der zum Teil sehr hohen Standardabweichungen (z.T. größer als der Mittelwert; s. Anhang C, Tab.2) nicht erkennbar. Ähnlich wie die gelben erreichten auch die grünen Luminophoren (63-125 μm) schon nach 2 Tagen ihre maximale Eindringtiefe von 9-10 cm; bis zum Experimentende nach 25 Tagen reduzierte sich die Eindringtiefe auf 7-8 cm. Auch hier waren die Standardabweichungen fast immer höher als die Mittelwerte. Ferner ließ sich auch hier auf Grund der Standardabweichungen (s. Anhang C, Tab.3) im obersten halben Zentimeter keine zeitliche Änderung ausmachen.

Auf der Grundlage dieses Resultats wurde unter Berücksichtigung der zeitlichen Koordination aller weiteren Arbeiten die Hälterungsdauer für Sedimente aus der Deutschen Bucht auf 10 Tage festgelegt.

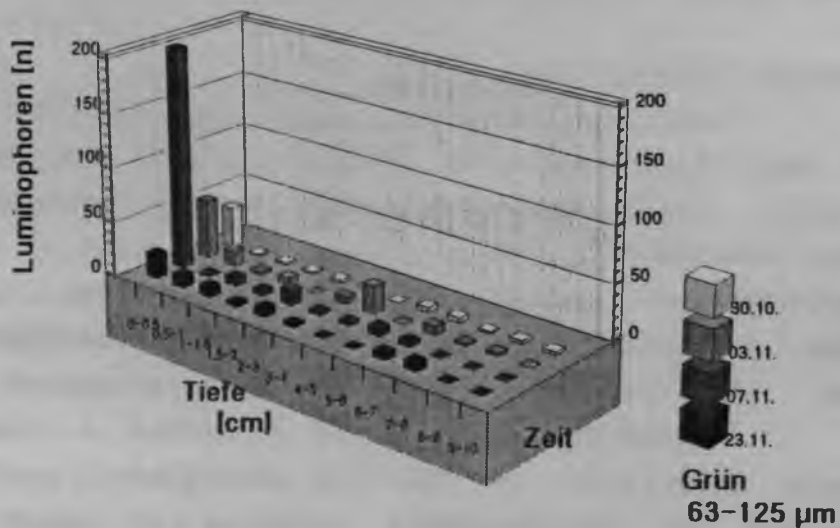
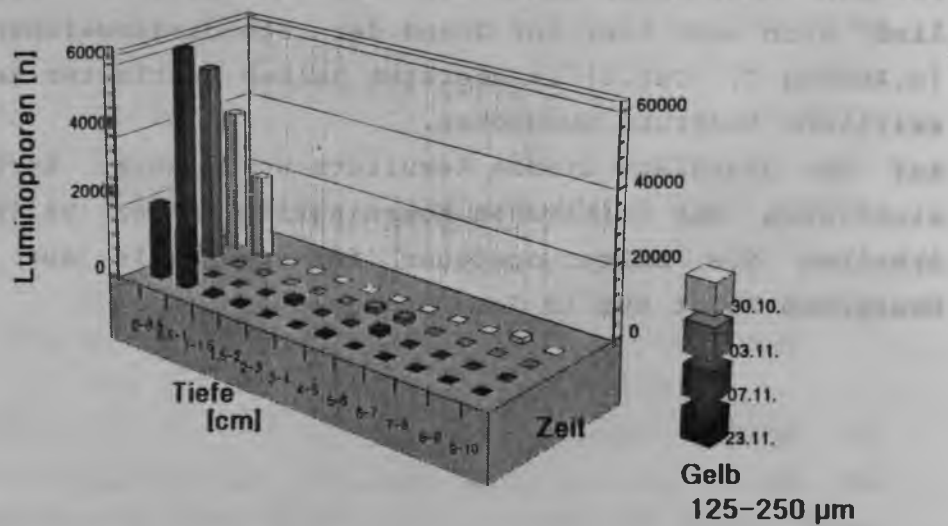
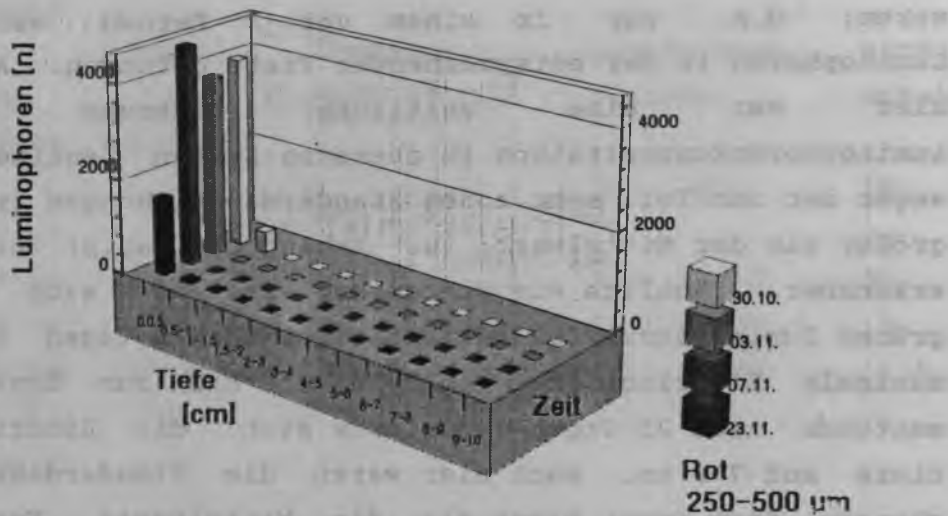


Abb.22 Zeitserie zur Ermittlung der Experimentdauer mit Sediment aus der Deutschen Bucht für drei Luminophorengrößenklassen durchgeführt im Oktober und November 1988

3.3.2. Jahrgang der Bioturbationsleistung in der Deutschen Bucht

In der Zeit von Oktober 1988 bis Oktober 1989 sollte mit einer etwa vierteljährlichen Probennahme untersucht werden, ob der Partikeltransport von der Sedimentoberfläche in die Tiefe jahreszeitlichen Schwankungen unterliegt.

3.3.2.1. Station Schlicksandgrund

Obwohl über ein ganzes Jahr beobachtet wurde, ließ sich unter Berücksichtigung der Standardabweichung aller Meßwerte (Anhang C) keine jahreszeitliche Schwankung beim Partikeltransport registrieren. Es fiel auf, daß die Eindringtiefe der Luminophoren mit abnehmender Korngröße zunahm. Die roten Luminophoren (250-500 µm) drangen, mit Ausnahme der Messung vom August 1989, nur bis 1.75 cm Tiefe ein. Diese Abweichungen im August rührten von Funden in einem einzigen Kern (bei drei Parallelen) her. Dabei fand man in der Oberflächenschicht (0-0.5 cm) zwischen 2000 und 4000 (+600-2000) Luminophoren, dagegen weniger als 100 in 1.75 cm Tiefe.

Gelbe Luminophoren drangen durchschnittlich 6 cm tief ein. Bei dieser Größenklasse war das Verteilungsmuster über die einzelnen Horizonte sehr wechselhaft und uneinheitlich. In der Oberflächenschicht fand man zwischen 10000 und 80000 Luminophoren, in der Tiefe dann nur noch 1500-5000. Grüne Luminophoren erreichten eine durchschnittliche Eindringtiefe von 9 cm. Hier ließ sich am ehesten ein Gradient (Abnahme) feststellen (10-200 Luminophoren an der Oberfläche und 5 Luminophoren in der Tiefe). Ein Jahrgang war nicht zu erkennen (s. Abb.23 a-c, Anhang C).

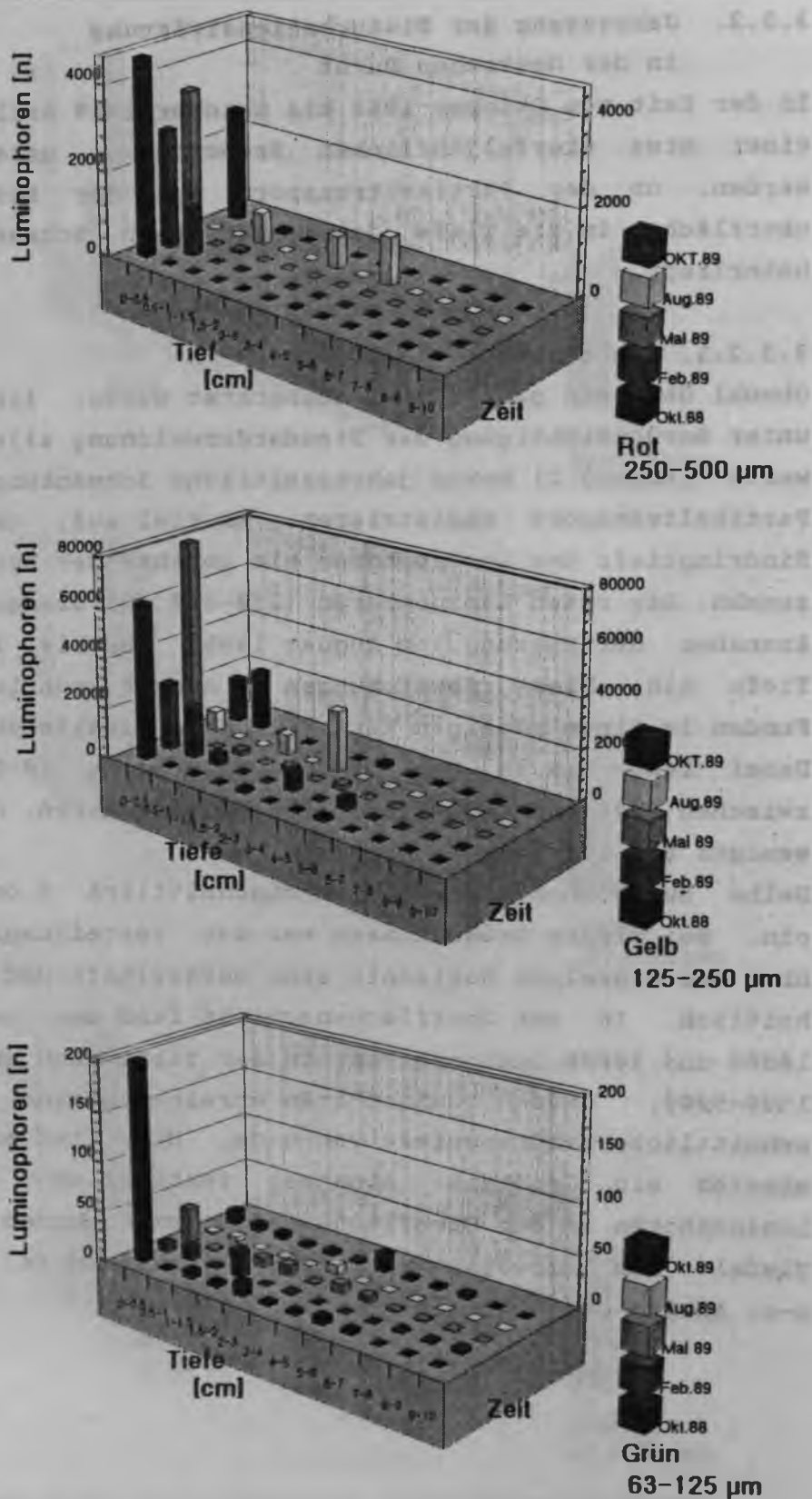
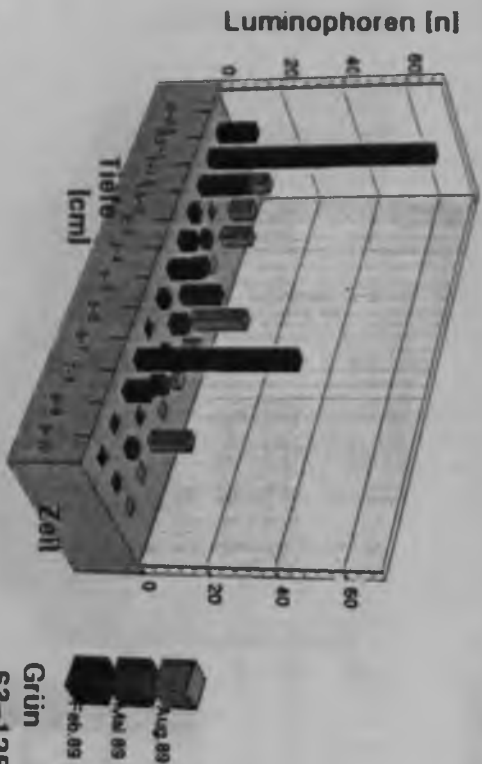


Abb.23 Jahresgang der Bioturbationsleistung der Benthosgemeinschaft auf der Station Schlicksandgrund in der Deutschen Bucht aufgenommen vom Oktober 1988 bis Oktober 1989

3.3.2.2. Station Schlickgrund

Aus technisch-logistischen Gründen war auf der Station Schlickgrund nur zu drei Terminen (Februar, Mai, August 1989) eine Probennahme möglich.

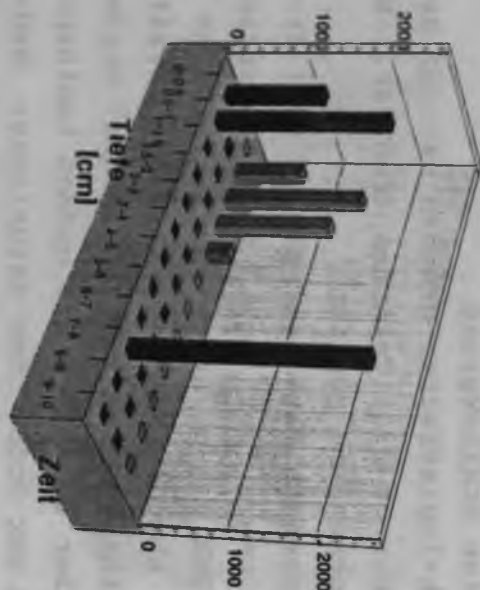
Aus den vorliegenden Daten (s. Abb.24 a-c) der 3 Termine läßt sich wegen der großen Standardabweichungen (s.Anhang C, Tab.5 a-c) keine jahreszeitliche Variabilität erkennen, obwohl im Februar eine Wintersituation und im August eine Sommersituation erfaßt werden konnte. Auffallend aber war, daß die grünen Luminophoren (63-125 μm), die der Größe der natürlichen Sedimentzusammensetzung am nächsten kommt, am tiefsten transportiert wurden (2-12 Luminophoren bis in 8-9 cm Tiefe). Die größeren und damit unnatürlicheren Fraktionen gelangten selten bis über 5 cm Tiefe hinaus; diese Werte waren immer mit sehr großen Standardabweichungen behaftet. Die Ergebnisse ähnelten denen der Station Schlicksandgrund (s.Kap.3.3.2.1.). Hier gelangten anscheinend in vereinzelt Kernen größere Luminophorenmengen (2600 rote und 7000 gelbe Luminophoren) direkt in die Schicht des Fundortes.



Grün
63-125 μm

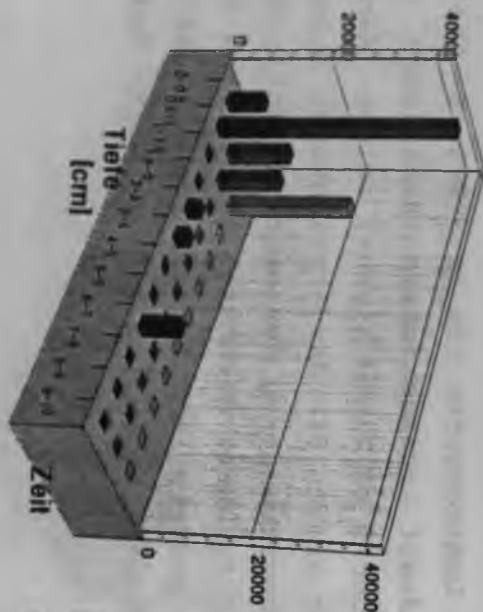
Abb. 24 Jahresgang der Bioturbationsleistung der Benthogemeinschaft auf der Station Schlickgrund in der Deutschen Bucht aufgenommen vom Oktober 1988 bis Oktober 1989

Luminophoren (n)



Rol
250-500µm

Luminophoren (n)



Gelb

125-250 µm

3.3.3. Simulation einer Sauerstoffmangelsituation

Da in den letzten Jahren häufiger Sauerstoffmangelsituationen in der Deutschen Bucht beobachtet wurden, sollte in diesem Experiment mit Sediment von der Station Schlicksandgrund der Einfluß sich ändernder Sauerstoffkonzentrationen im bodennahen Wasser auf Partikelumlagerungen im Sediment untersucht werden. Dazu wurden von jeder Luminophorenfarbe (Größenklasse) 3 Verteilungskurven miteinander verglichen:

- a. Kerne unter Normalbedingungen, O_2 -Sättigung $\geq 90\%$
- b. Kerne unter Sauerstoffreduktion, O_2 -Sättigung $\approx 30\%$
(Hypoxie 14 Tage)

- c. Kerne in der "Regenerationsphase", O_2 -Sättigung erneut $\geq 90\%$ (O_2 -Anstieg innerhalb der ersten 24 h)

Grundsätzlich ließ sich feststellen (Abb. 25), daß die drei Verteilungskurven (oxisch, hypoxisch und regeneriert) pro Farbe auf Grund der Standardabweichungen (Anhang C, Tab.6) nicht voneinander zu unterscheiden waren. Die Eindringtiefen der Farben (Größenklassen) unterschieden sich jedoch. Die Farben Gelb (125-250 μm) und Grün (63-125 μm) drangen bis in Tiefen von 8-10 cm vor, während Rot (250-500 μm) nur bis in 2 cm Tiefe gelangte. Dabei blieben, wie schon in der Zeitserie (s.Kap.3.3.1.), die meisten Luminophoren (etwa 3000) in den oberen 0.25 cm liegen. In 1.5-2 cm Tiefe gelangten dann nur noch weniger als hundert Luminophoren.

Nur für die gelben Luminophoren (125-250 μm) ließ sich ein von der O_2 -Sättigung abhängiger Transport vermuten. Unter oxischen Bedingungen gelangten etwa 2000 (± 2787) Luminophoren in eine Tiefe von 4-5 cm. Unter hypoxischen Bedingungen wurden die Luminophoren nur 1 cm tief eingearbeitet. In den Kernen, die eine Regeneration erlebten war die maximale Eindringtiefe der Luminophoren dagegen 8-9 cm (552 ± 486 Luminophoren). Bei nur drei Parallelkernen und den großen Standardabweichungen ist diese Beobachtung aber nicht statistisch abzusichern.

Wie schon in den vorangegangenen Experimenten mit Sedimenten aus der Deutschen Bucht zu beobachten, verblieben auch hier die meisten grünen Luminophoren (14-20) im obersten halben Zentimeter. In den untersten Schichten fand man nur noch durchschnittlich 2-4 Luminophoren.

Wie in bisher allen Experimenten waren die Standardabweichungen sehr groß.

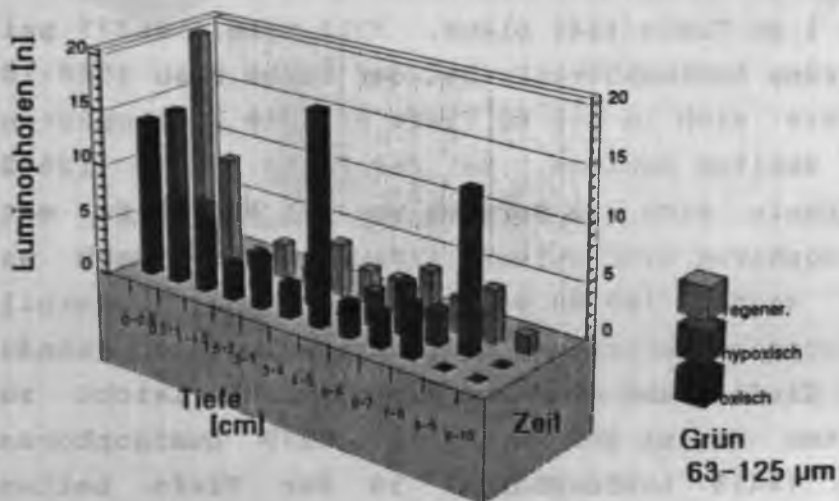
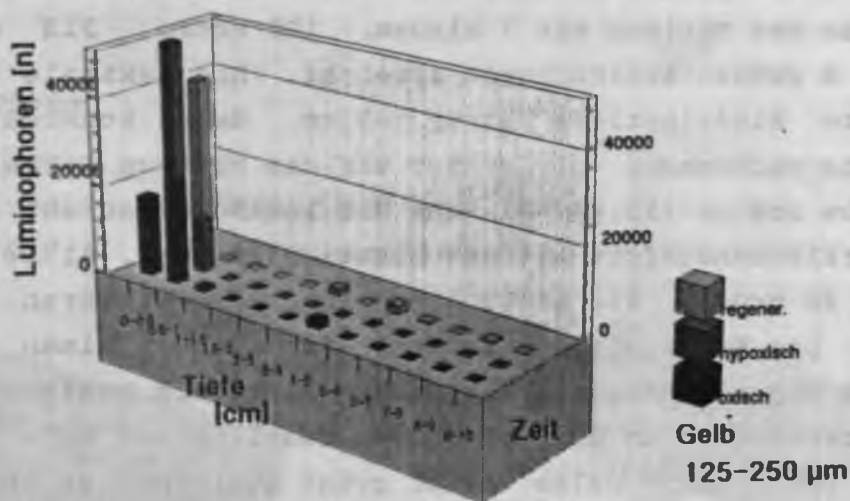
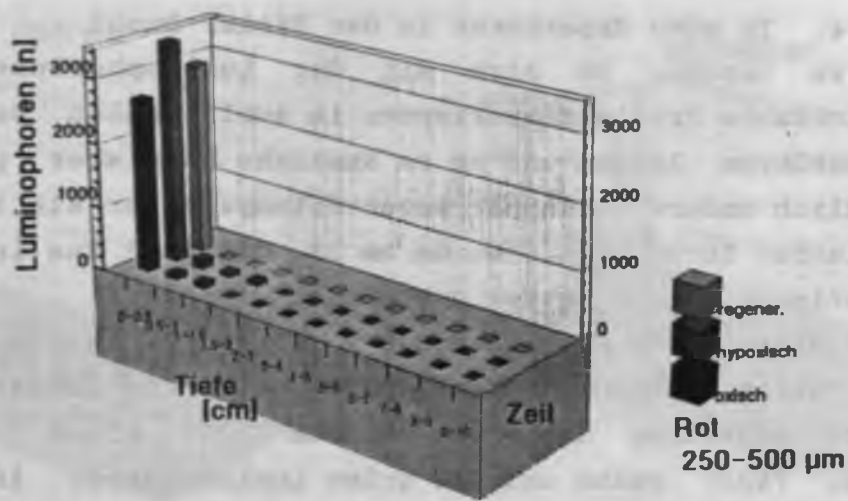


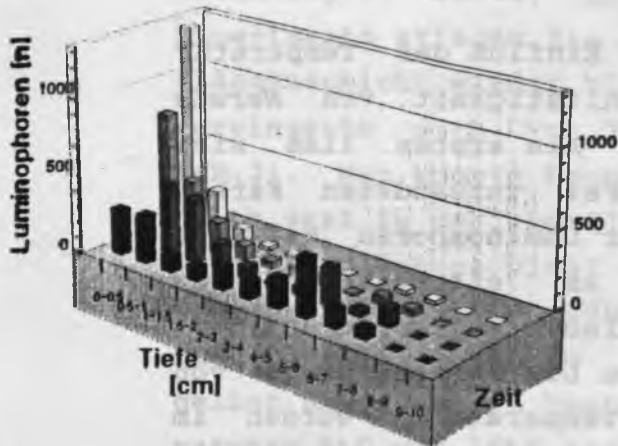
Abb.25 Simulation einer Sauerstoffmangelsituation mit Sedimenten aus der Deutschen Bucht. Es wurden oxisch und hypoxisch gehälterte Sedimente beobachtet. Verglichen wurden damit Sedimente, die nach einer hypoxischen Phase wieder unter oxischen Bedingungen gehältert wurden.

3.3.4. In situ Experiment in der Kieler Bucht

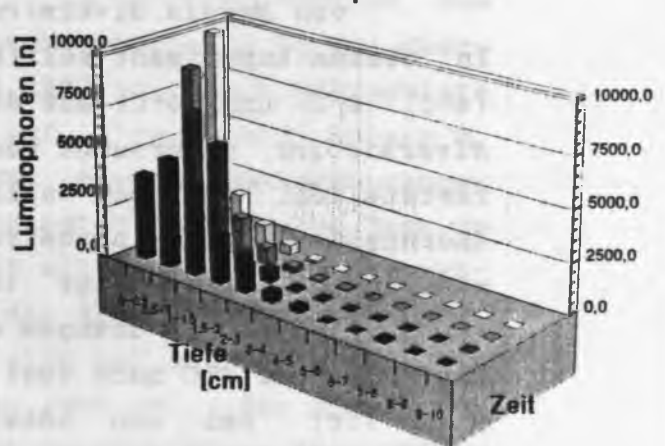
Um zu testen, ob sich mit der Luminophorenmethode praktikable Freilandexperimente im sublitoralen Bereich durchführen lassen und ob es ähnliche oder aber grundsätzlich andere Luminophorenverteilungsmuster als in der Deutschen Bucht gibt, wurde am 30. Mai 1988 das in situ Experiment in der Ostsee gestartet.

Nach einer Woche Experimentdauer (06.06.88) zeigte sich bei allen Farben (Größenklassen) eine zu erwartende Verteilungskurve mit einem Maximum (1330 blaue, 10154 rote, 76327 gelbe und 320 grüne Luminophoren) in den obersten 0.5 cm (s.Abb.26). In 2-4 cm Sedimenttiefe wurde das Minimum mit 7 blauen, 126 roten, 312 gelben und 6 grünen Luminophoren erreicht. Die maximale ermittelte Eindringtiefe betrug 7-9 cm, dabei konnten auch Werte vorkommen, die größer als das Minimum waren. Eine Woche später (15.06.88) sank die Luminophorenzahl in der Oberflächenschicht auf 809 blaue, 8729 rote, 61710 gelbe und 48 grüne; sie stieg hingegen in den tieferen Lagen an. Die Eindringtiefe änderte sich nicht. Einen Monat nach Experimentbeginn (30.06.88) hatte die Luminophorenkonzentration an der Oberfläche deutlich auf 197 blaue, 506 rote, 11220 gelbe und 11 grüne Luminophoren abgenommen. Bei allen vier Farben bildete sich ein Maximum in etwa 1 cm Tiefe (446 blaue, 7211 rote, 36777 gelbe und 49 grüne Luminophoren). Bei der Farbe Blau (500-1000 μm) bildete sich in 5-6 cm Tiefe mit 249 Luminophoren noch ein zweites Maximum. Bei der Farbe Gelb (125-250 μm) zeichnete sich im Bereich von 3-5 cm Tiefe mit 5610 Luminophoren eine weitere Ansammlung ab. Nach weiteren fünf Wochen (09.08.88) hatte sich das Gesamtbild der Luminophorenverteilung nur noch geringfügig geändert. In der Tiefe nahm die Luminophorenzahl leicht zu. Die zweiten Maxima der Farben Blau (379 Luminophoren) und Gelb (8415 Luminophoren) in der Tiefe hatten sich ausgeprägt. Die maximale Eindringtiefe der Luminophoren hatte sich über die gesamte Experimentdauer nicht deutlich geändert.

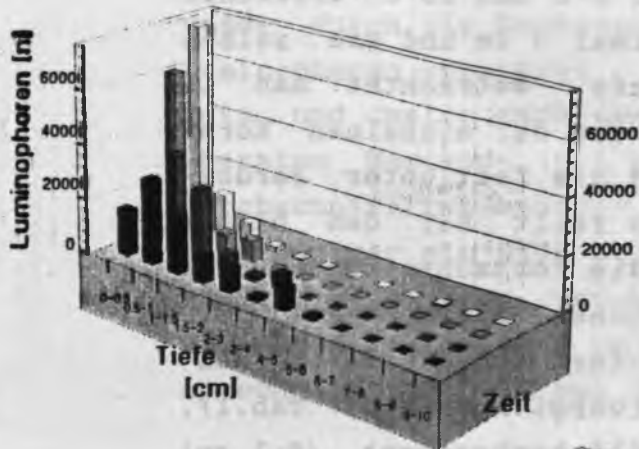
Blau
500-1000 μm



Rot
250-500 μm



Gelb
125-250 μm



Grün
63-125 μm

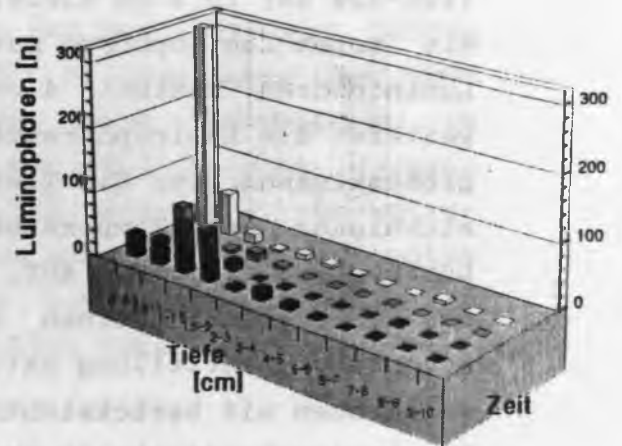


Abb.26 In situ Experiment in der Kieler Bucht aus dem Sommer 1988

3.3.5. Temperaturabhängigkeit der Bioturbationsleistung von *Nereis diversicolor*

In diesem Experiment sollte der Einfluß der Temperatur (4°C, 8°C und 16°C) auf die Wühltätigkeit von *Nereis diversicolor* untersucht werden. Als erstes ließ sich feststellen, daß bei allen drei verwendeten Farben (Korngrößen) das Einarbeiten der Luminophoren bei der niedrigsten Temperatur (4°C) am effektivsten war (s. Abb. 27-29). So drangen die blauen Luminophoren (500-1000 µm) bei 4°C nach zwei Tagen bis in eine Tiefe von 9 cm vor; bei den höheren Temperaturen wurden im gleichen Zeitraum nur 7 cm Tiefe erreicht. Die roten Luminophoren (250-500 µm) gelangten bei 4°C in zwei Tagen bis in 7 cm Tiefe und die gelben Luminophoren (125-250 µm) in 8 cm Tiefe. Bei 8°C und 16°C erreichen die roten Luminophoren nur maximal 3 cm und die gelben Luminophoren maximal 4 cm Tiefe. Betrachtet man im weiteren die Luminophorenverteilung der einzelnen Korngrößenklassen über die Tiefe und die Zeit unter Berücksichtigung der Temperatur, so fällt bei den blauen Luminophoren (Abb. 27) auf, daß die fortschreitende Dauer des Experiments keinen deutlichen Einfluß auf die Luminophorenverteilung hatte, sofern man die Standardabweichungen mit berücksichtigt (vergl. Anhang E, Tab. 1). Die Luminophorengehalte im Oberflächenhorizont (0-1 cm) lagen bei 400-500 mit Standardabweichungen von zum Teil 100%. In der Tiefe nahmen die Luminophorengehalte deutlich ab (meist unter 100 Luminophoren pro Horizont), aber die Standardabweichungen überstiegen 100% des Mittelwerts. Eine Temperaturabhängigkeit des Partikeltransports ließ sich für blaue Luminophoren (500-1000 µm) nicht feststellen. Die Luminophoren der Größenklassen 250-500 µm (Rot) und 125-250 µm (Gelb) zeigten ein sehr ähnliches Verteilungsbild (Abb. 28, 29). Bei beiden Größenklassen war der Luminophoreneintrag bei 4°C am deutlichsten. Hier läßt sich auch eine zeitliche Variabilität erkennen, die am Beispiel der roten Luminophoren beschrieben werden soll. Nach zwei Tagen Experimentdauer fand man in der Oberflächenschicht 580 Luminophoren, in den nächsten beiden Schichten 437 und 450 und in den

vier folgenden Schichten jeweils unter 100 Luminophoren (s. Anhang E, Tab. 2, Abb. 30). Im weiteren Verlauf des Experiments stiegen die Luminophorengehalte in der Oberflächenschicht wieder bis auf 1503 an; die Eindringtiefe verringerte sich von 7 cm auf 2 cm (vergl. Anhang E, Tab. 2). Man konnte beobachten, wie die Luminophorengehalte erst in den oberflächennahen Schichten und dann in der Oberflächenschicht selbst mit zunehmender Experimentdauer anstiegen, während die Eindringtiefe abnahm. Das gleiche Phänomen ließ sich bei 4°C auch an den gelben Luminophoren beobachten (Abb. 29). Für die Temperaturen 8°C und 16°C ließ sich dagegen diese Beobachtung bei beiden Farben nicht machen. Der sich für die blauen Luminophoren andeutende Eindruck, daß bei 8°C die Bioturbation am geringsten war, wurde durch die Beobachtungen bei den roten und gelben Luminophoren verstärkt. Bei 8°C blieben immer über 1600 rote und meist auch über 6000 gelbe Luminophoren im obersten Horizont (0-1 cm). Bei 16°C blieben dagegen durchschnittlich weniger als 1300 rote und durchschnittlich weniger als 5500 gelbe Luminophoren in der obersten Schicht. Dagegen waren die Luminophorengehalte im zweiten Horizont (1-2 cm) deutlich höher als in der entsprechenden Schicht bei 8°C.

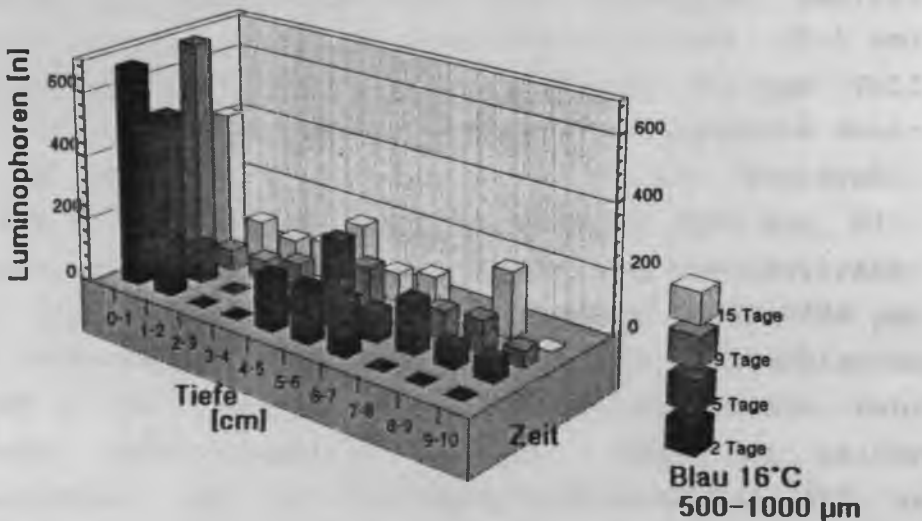
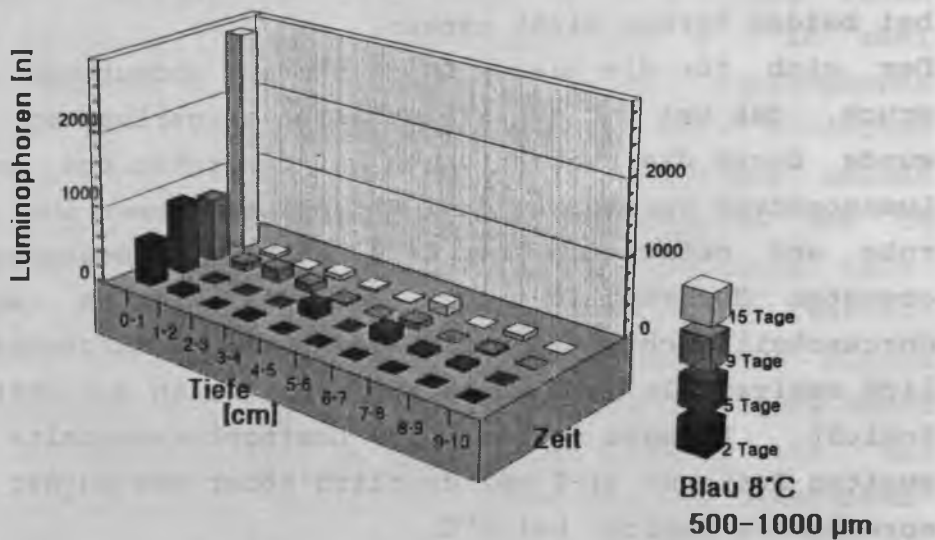
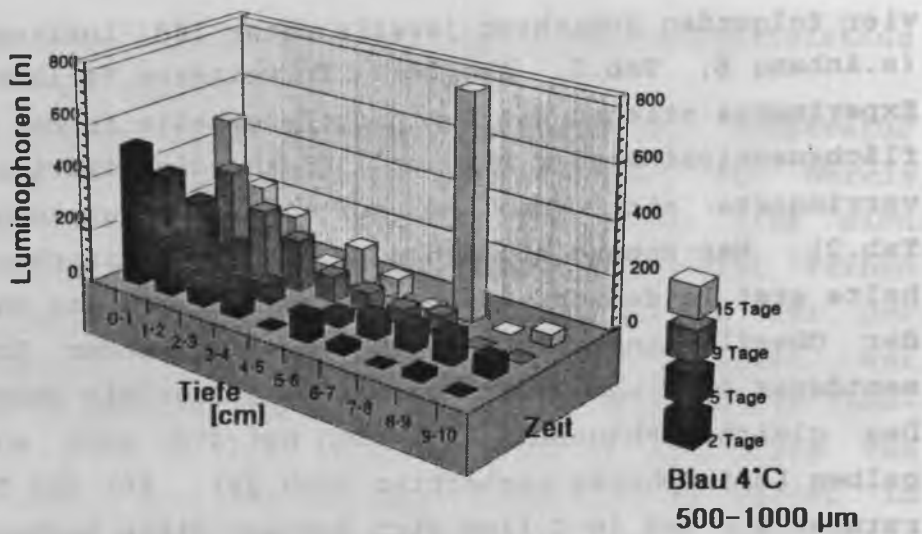


Abb.27 Temperaturabhängigkeit der Bioturbationsleistung von *Nereis diversicolor* bei 4°C, 8°C und 16°C, dargestellt mit blauen Luminophoren (500-1000 μm)

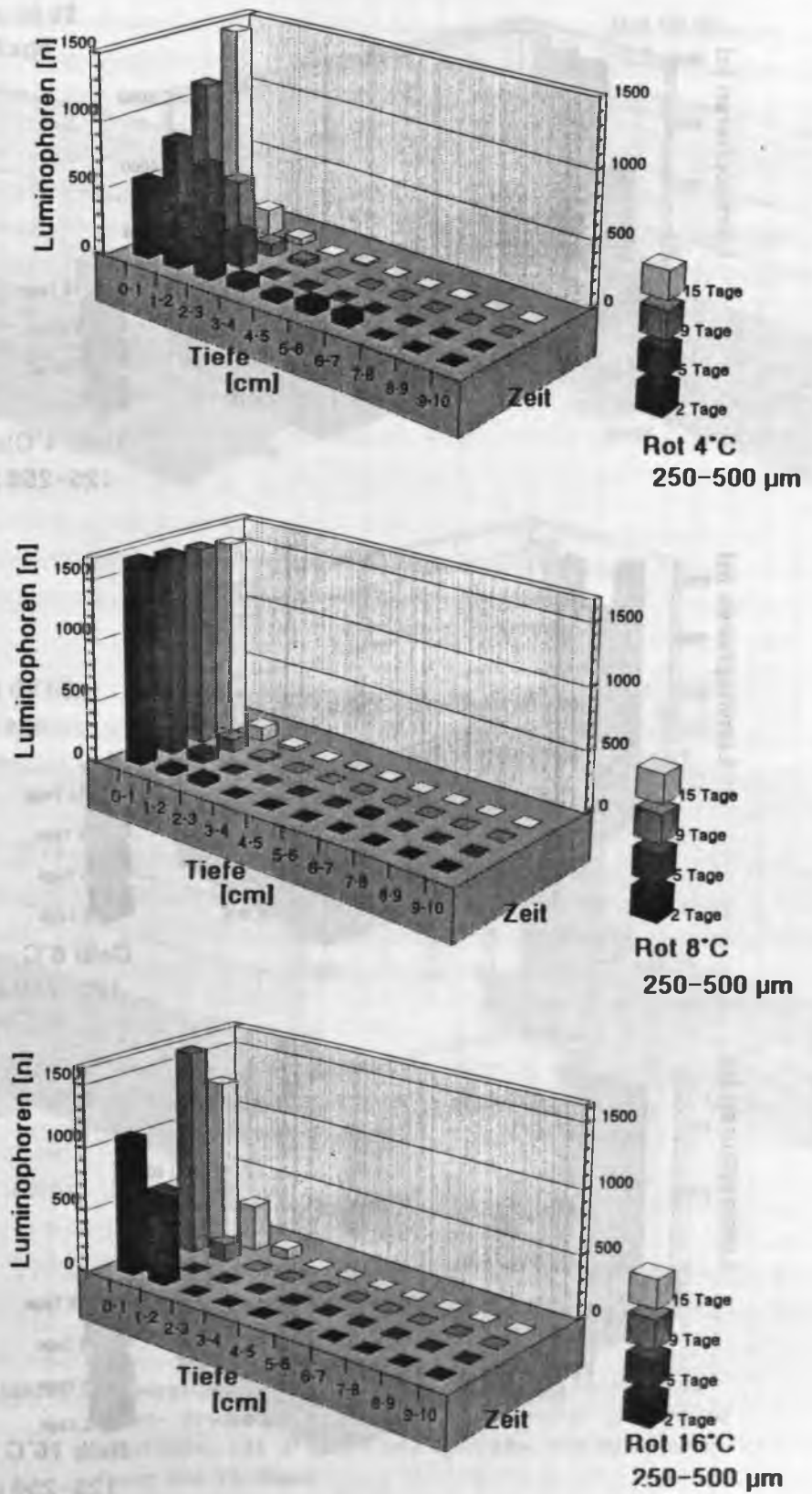


Abb.28 Temperaturabhängigkeit der Bioturbationsleistung von *Nereis diversicolor* bei 4°C, 8°C und 16°C, dargestellt mit roten Luminophoren (250-500 µm)

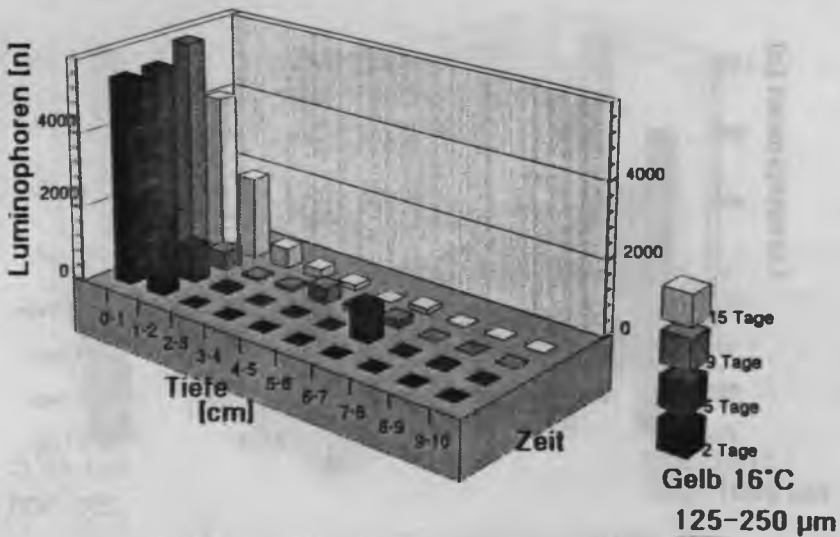
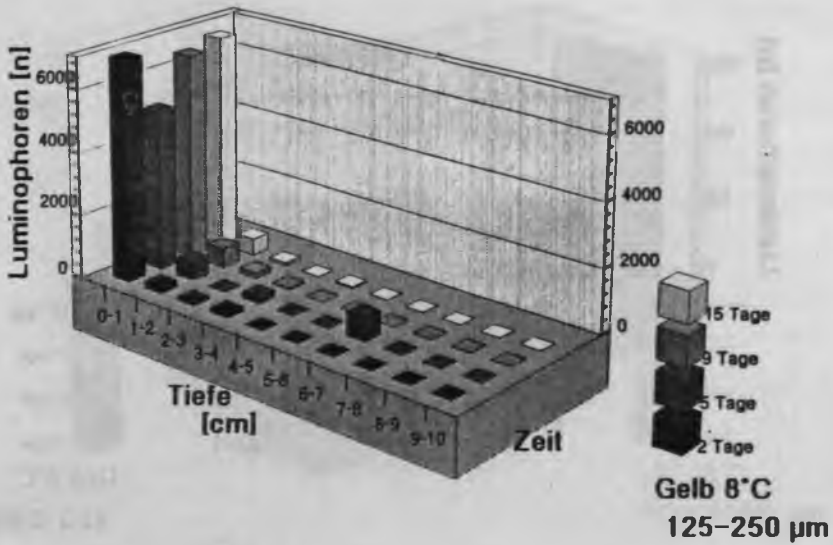
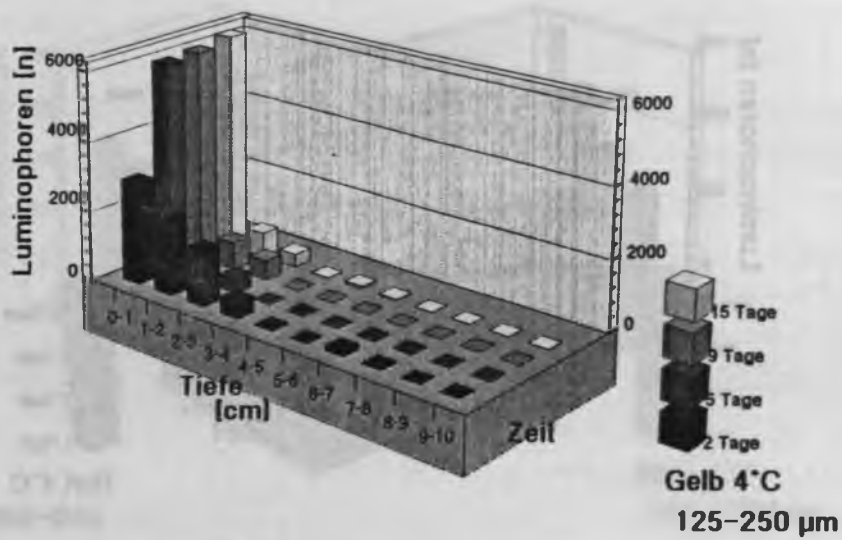


Abb. 29 Temperaturabhängigkeit der Bioturbationsleistung von *Nereis diversicolor* bei 4°C, 8°C und 16°C, dargestellt mit gelben Luminophoren (125-250 μm)

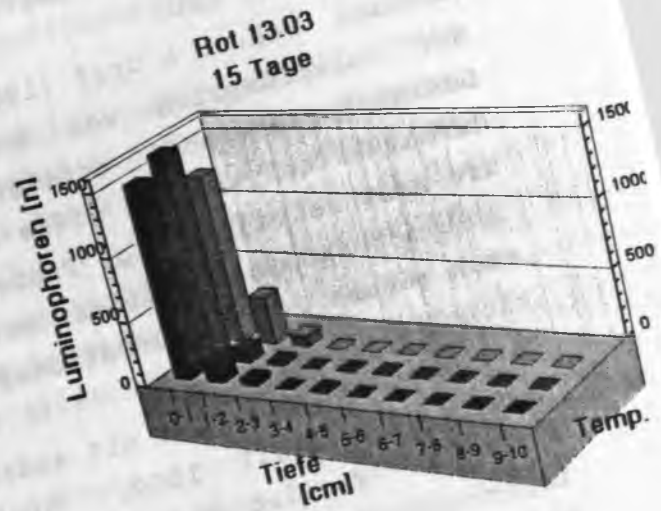
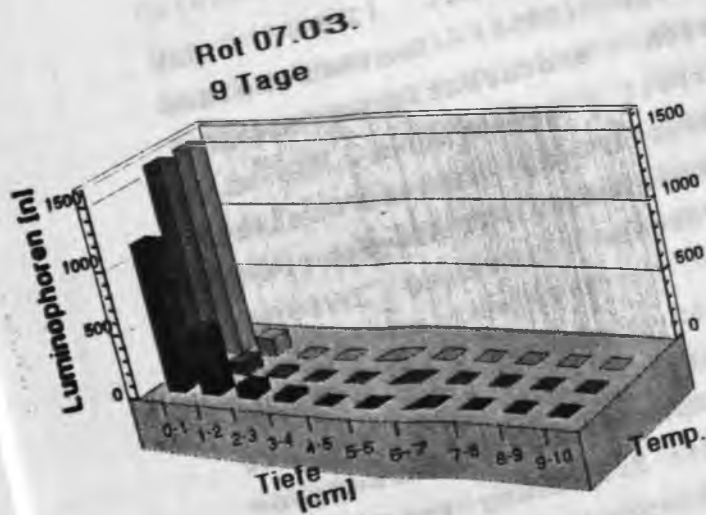
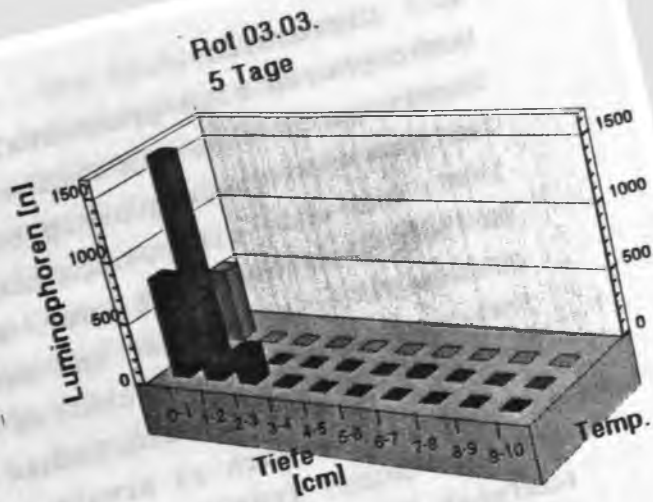
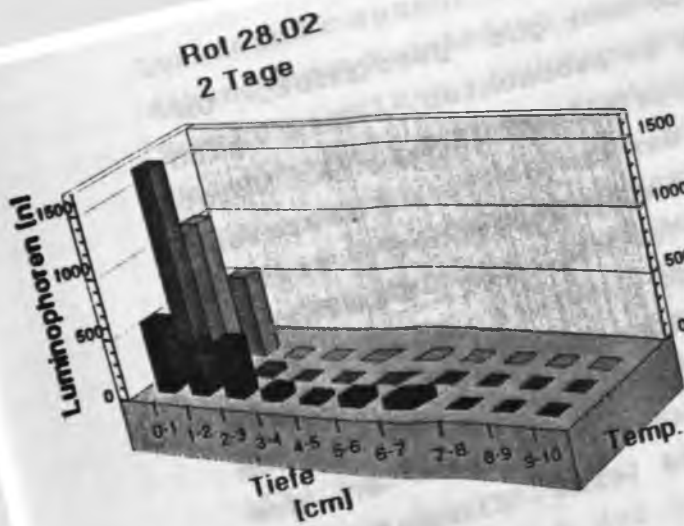


Abb. 30 Temperaturabhängigkeit der Bioturbationsleistung von *Nereis diversicolor* für rote Luminophoren (250-500 µm), verglichen bei 4°C, 8°C und 16°C über die Experimentdauer von 15 Tagen

4. Diskussion

Luminophoren sind grundsätzlich sehr gut geeignet, Umlagerungsprozesse im Sediment zu beobachten. Sie sind leicht und kostengünstig herzustellen (Hoeg & Voigt 1967) und ohne eine Gefährdung der Umwelt einzusetzen. Da sie aus Sediment der zu untersuchenden Station gewonnen werden können und der Vorgang der Einfärbung ihre Oberflächeneigenschaften so gut wie nicht verändert, ist ein natürliches Bewegungsverhalten des Tracers im Versuch zu erwarten (Ruck 1972). Außerdem stellte Ruck (1972) fest, daß der Farbabrieb an den Luminophoren nur gering ist und sie eine Einsatzdauer von mehr als zwei Jahren haben.

4.1. Methodik der automatisierten Luminophorenauswertung mit dem LAUS

Nachdem Mahaut & Graf (1987) und Powilleit (1988) mit der ursprünglich von Zenkovic (1958) entwickelten Luminophorenmethode erfolgreich Bioturbationsversuche durchführten, sollte diese Arbeit u.a. zeigen, ob sich die sehr zeitaufwendige Probenauswertung automatisieren läßt und ob man mit dieser Methode außer Transportraten auch andere für Bioturbationsprozesse relevante Informationen gewinnen kann.

Ein Vergleich des LAUS mit anderen automatischen Zählanlagen (Nachtigall 1964, Striggow 1966) ist nicht sinnvoll. Es ging den genannten Autoren bei küstengeologischen Untersuchungen nur um die Erkennung und Zählung von Luminophoren in großen Probenmengen. Der sehr viel einfacheren Aufgabenstellung entsprechend hatten die Autoren ein gänzlich anderes System entwickelt.

Das für das LAUS entwickelte Konzept mit einer Erfassung der Ortsdaten der Luminophoren erfüllte die gestellten Anforderungen weitestgehend. Aber auch dieser Prototyp des LAUS bedarf einer Weiterentwicklung.

Geändert werden müßte als erstes die Festlegung der Ortsdaten der einzelnen Luminophoren. Bisher geschieht dies auf Grund von Intensitätsmaxima der Leuchtpunkte. Hat eine Luminophore mehrere Intensitätsmaxima (das ist vor allem bei großen Luminophoren möglich), so wird die

Luminophorenzahl überbewertet. Das Rechnerprogramm muß dahingehend geändert werden, daß die Ortsdaten auf das Zentrum eines Leuchtpunkts festgelegt werden. Eine Unterschätzung der Luminophorenzahl ist unwahrscheinlich, denn selbst in oberflächennahen Schichten mit hohen Luminophorenkonzentrationen wurden bei Zählungen mit dem Auge nie zwei Luminophoren mit Berührung festgestellt. Ferner ist es für die Zukunft wünschenswert, daß die Datenfiles in ein Tabellenkalkulationsprogramm übernommen werden können.

Alle weiteren Verbesserungen ergeben sich aus der technischen Optimierung einzelner Systemkomponenten.

So ließe sich der zeitliche Aufwand beim Scannen der Folien durch Verwendung eines 486er-Rechners (jetzt 286er-Rechner) deutlich verringern, da die anfallende Datenmenge - vor allem bei oberflächennahen Proben - immens ist.

Inzwischen gibt es auch deutlich lichtempfindlichere Videokameras mit höherer Graustufen- oder Farbauflösung; es wäre zu überlegen, ob es jetzt schon möglich ist, eine hochempfindliche Farbkamera zu verwenden. Dies würde erlauben, auch Luminophorenfarben mit ähnlichem Spektrum zu verwenden, was im Moment noch Probleme bei der Unterscheidung, vor allem bei lichtschwachen Objekten, bereiten kann.

Hier sei auch auf die Möglichkeit einer Verwechslung von natürlich fluoreszierenden Partikeln (Moluskschalen und einige Minerale) mit Luminophoren hingewiesen. Diese Möglichkeit war bei den durchgeführten Bioturbationsversuchen nur von untergeordneter Bedeutung, da vor allem in den oberen Schichten viele Luminophoren gefunden werden und die Zahl der gefundenen Luminophoren auf die zugegebene Luminophorenzahl hochgerechnet wird. Eine weitere Verbesserung ließe sich durch den Einbau einer vergrößernden Optik erreichen. Dazu müßte dann aber die Probenhalterung computergesteuert beweglich sein (ähnlich dem Objektisch eines Mikroskops), um trotz der Vergrößerung ein einwandfreies Scanning der Gesamtprobe zu ermöglichen. Dies ist vor allem dann von Bedeutung, wenn man die für die Schadstoffanlagerungen

und -transportprozesse wichtigen kleinen Partikel ($\leq 20 \mu\text{m}$) untersuchen will (Kersten & Krönke 1990). Luminophoren sind für Bioturbationsversuche gut geeignet; es traten bei meiner Untersuchung nur insofern Schwierigkeiten auf, als sie nicht so intensiv fluoreszierten wie die von mir in Vorversuchen verwendeten Proben einer anderen Herstellungsserie. Dies könnte zum einen an nicht gründlich genug gereinigtem Sediment liegen, das keine optimale Farbanhaftung zuließ. Zum anderen scheint aber auch eine Veränderung des Fluoreszenzfarbstoffs aufgetreten zu sein, die eine Verminderung der Leuchtkraft bewirkte. Für diese Möglichkeit spricht, daß auch Kollegen aus dem geologischen Institut der Universität Kiel das Problem einer verminderten Leuchtkraft von Luminophoren feststellten. Hier müßte man ggf. nach einem intensiveren Fluoreszenzfarbstoff suchen.

Die Grenze der Einsetzbarkeit von Luminophoren zeigt sich in der Tatsache, daß man Partikel $< 63 \mu\text{m}$ nur sehr schlecht herstellen kann. Darüber hinaus ist die Leuchtkraft solcher Luminophoren sehr gering. Werden solche Korngrößen benötigt, kann man aber, sofern es die Versuchsumstände zulassen, auf sehr fluoreszenzstarke "Microspheres" von verschiedenen Herstellern ausweichen. Eine Erkennbarkeit durch das LAUS wäre zu überprüfen und nötigenfalls durch Modifikationen (z.B. Vergrößerungsoptik) zu erreichen.

Die Präparation der Probenkerne durch das Abtragen sehr dünner Sedimentschichten mittels Klebefolien erwies sich in der Praxis für sandige Sedimente als gut geeignet. Die Sedimentanhaftung an die Klebefolie war meist flächig und gleichmäßig. Durch die Verwendung von je 3 Klebefolien nacheinander konnte man Ansammlungen von Luminophoren, wie sie z.B. durch biologische Aktivitäten verursacht werden können, gut erfassen. Wird eine Luminophore nicht gleich mit der ersten Klebefolie abgetragen, so erfaßt sie doch eine der beiden nächsten Folien. Dabei erfolgt zwar eine Verfälschung der Tiefenangabe des Fundortes im Kern, aber die Abweichung von der realen Tiefe ist geringer als 1 mm und damit im

Bereich der Genauigkeit (± 1 mm), mit der die Sedimentkerne aus den Stechrohren gedrückt werden können. Problematisch wird diese Präparationsmethode bei schlammigen und damit sehr wasserhaltigen und an organischen Substanzen reichen Sedimenten. Bei zunehmender Feuchtigkeit wird die Sedimentanhaftung an die Klebefolie schlechter; es treten häufiger freie Flächen auf. Außerdem variiert die Dicke der Sedimentanhaftung an der Klebefolie bei Schlamm-sedimenten mehr als bei sandigem Sediment. Bei zu unregelmäßiger und/oder zu großer Feuchtigkeit in der Probe wird die Klebefolie wellig und uneben. Da nahezu alle Kunststoffe, Kleber und Lacke unter UV-Licht blau fluoreszieren, hat eine unebene Oberfläche eine Überschätzung der blauen Luminophoren zur Folge.

Außer zum Zählen von Luminophoren in einzelnen Horizonten oder Kernabschnitten ist das LAUS auch dazu geeignet, unter bestimmten Voraussetzungen biogene Gang- und Grabstrukturen in Experimenten sichtbar zu machen. Zu diesen Voraussetzungen gehört eine genaue Kenntnis der Lebensweise des zu untersuchenden Tieres um das Experiment entsprechend zu gestalten. Grabstrukturen von benthischen Tieren sind dann nachweisbar, wenn die Versuchstiere Luminophoren in von ihnen erzeugte Bauten einarbeiten. So beobachteten Ziebis & Teucher (unveröffentlicht), wie *Callianassa tyrrhena*, ein im Mittelmeer lebender Thalassionide, in einem Experiment Luminophoren aus einer in den Kern eingefügten Tracerschicht andersorts in die Wandungen seines Ganges einbaute. Solche Beobachtungen sind vor allem dann möglich, wenn nur ein bestimmtes Tier in einem Kern gehalten wird und nicht andere Tiere die Grabstrukturen wieder zerstören. Bei Proben aus der Nordsee war zu beobachten, daß *Lanice conchilega* auf die Sedimentoberfläche aufgebrachte Luminophoren in seine Röhrenkonstruktion einbaute. Diese Beobachtungen konnten aber im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht weiter verfolgt werden.

4.2. Der Partikeltransport in den Bioturbationsversuchen

Für viele geologisch-paläontologische Fragestellungen ist die Kenntnis des genauen Alters der Sedimente von großem Interesse. Die zur Altersbestimmungen (^{14}C oder andere Isotopenbestimmungen) benötigten Stratigraphien werden aber durch Bioturbation gestört (Rhoads 1974, Berger & Johnson 1978, Aller, 1982, McCall & Tevesz 1982). Diese Prozesse versuchten schon viele Autoren zu quantifizieren und in Modellen zu beschreiben (z.B. Berger & Heath 1968, Guinasso & Schink 1975, Matisoff 1982, Boudreau 1986).

Ferner spielt der Partikeltransport für Untersuchungen der Schwermetall- und Schadstoffproblematik eine wichtige Rolle. So ist es für "belastete" Partikel von Bedeutung, ob sie sich in oxischem oder anoxischem Milieu befinden. Hiervon hängt es ab, ob ihre Fracht löslich und deshalb leicht remobilisierbar oder unlöslich ist (Aller 1978, Kersten et al 1985).

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Bioturbationsversuche sollten helfen, beim Partikeltransport ablaufende Prozesse besser kennen und verstehen zu lernen und die Transporte genauer zu quantifizieren.

4.2.1. Bioturbationsbedingte Sedimentumlagerungen auf der Station Schlicksandgrund in der Deutschen Bucht

Auf Grund der Temperaturschwankungen von 10°C (5°C im Februar 1989 und 15°C im August 1989), die während der Probennahme im bodennahen Wasser beobachtet wurden, und einer Planktonsukzession in der Wassersäule (Hagmeier & Bauerfeind 1990, Krause 1990), verbunden mit einer benthisch-pelagischen Kopplung (Graf 1989 a), war mit einer jahreszeitlichen Variation des Partikeltransports zu rechnen.

Dieser erwartete Jahresgang läßt sich aber mit den Ergebnissen aus Kap. 3.3.2.1. nicht bestätigen.

Auch die Untersuchungen der Sedimentparameter (Wasser-, Kohlenstoff-, Protein- und Chlorophyll-a-gehalt, s. Kap.3.1.) geben bei den großen Zeitabständen zwischen den Probennahmen keine Hinweise auf Jahresgänge.

Während der Probennahmen wurden zwar keine Untersuchungen über die momentanen Strömungsverhältnisse und die Partikelkonzentrationen im bodennahen Wasser angestellt, aber unter Zugrundelegung durchschnittlicher Strömungsverhältnisse (Eisma & Irion 1988, Radach et al 1990) ist zu vermuten, daß die Station Schlicksandgrund das ganze Jahr über mit organischem Material versorgt wird. Wahrscheinlich aber variiert die Zusammensetzung und damit die Qualität des Materials.

Mit Temperaturen um 5°C ist die Wintersituation während der Untersuchungen als mild anzusehen. In diesem Zusammenhang mag eine Temperaturschwankung von 10°C bei einer ausreichenden Versorgung mit organischem Material durch laterale Advektion (Graf 1989 b) nicht ausreichen, die Bioturbationsleistung der Benthosgemeinschaft so zu beeinflussen, daß sich ein Jahresgang abzeichnet.

Diese Beobachtung könnte darauf hinweisen, daß die Tiere des Benthals das ganze Jahr über, sofern die Winter mild genug sind, eine gleichbleibende Energiemenge in Bewegung umsetzen. Sofern dies zutrifft und man voraussetzt, daß die Futterqualität im Winter schlechter ist als im Frühjahr und Sommer, würde das bedeuten, daß die Benthostiere im Winter nur einen "Normalbetrieb" aufrechterhalten und im Frühjahr und Sommer die durch höherwertiges Futter erzielten Energiegewinne für Wachstum und Reproduktion nutzen.

Auch die Simulation einer Sauerstoffmangelsituation mit minimal 30% Sauerstoffsättigung (etwa 2.5 mg l⁻¹), wie sie zwischen 1981 und 1983 vorkamen (Hickel et al 1989), zeigt keinen nachweisbaren Einfluß auf die bioturbationsbedingte Partikelumlagerung. Weder bei hypoxisch gehaltenen Sedimentkernen noch bei Kernen, die eine Regeneration mit wieder sauerstoffgesättigtem Wasser erlebten, konnte ein Unterschied zu Vergleichskernen festgestellt werden. Beim Aufarbeiten der manipulierten Sedimentkerne befanden sich zwar fast alle Seeigel (*Echinocardium cordatum*) nahe oder an der Sedimentoberfläche, aber dies schien keinen sichtbaren Einfluß auf die Bioturbationsleistung der Benthosgemeinschaft zu haben. Es läßt sich daraus folgern, daß für die meisten

Benthosorganismen diese simulierte Sauerstoffmangelsituation noch nicht als kritisch anzusehen war (Rosenberg 1980, Dries & Theede 1974).

Da sowohl die Untersuchung eines Jahresgangs als auch eine simulierte Sauerstoffmangelsituation keine deutlichen Variationen im bioturbaten Partikeltransport zeigten, kann man die in Tab.3 zusammengestellten Werte als eine Abschätzung der mittleren Nettoeinträge aus dem obersten Millimeter Sediment innerhalb von 10 Tagen betrachten.

Tab.3 Sedimentumlagerung aus dem 1 mm in die Tiefe
Station Schlicksandgrund in der Deutschen Bucht

Korngröße [µm] Luminophoren- farbe	Eindring- tiefe [cm]	Partikel- zahl [n] pro Kern	Sedimenttransport pro Fläche x Zeit [g m ⁻² 10 d ⁻¹]
250-500	tiefer 0.5	293	2.55
Rot	" 1	98	1.27
	bis in 1-1.5	98	1.27
125-250	tiefer 0.5	343999	423.98
Gelb	" 1	157667	193.53
	bis in 5-6	43	53.47
63-125	tiefer 0.5	1030769	193.53
Grün	" 1	1000000	187.16
	bis in 8-9	30769	6.37
Σ aller	tiefer 0.5		620
Fraktionen	" 1		382

Als Grundlage zur Ermittlung der in Tab.3 aufgeführten Werte dienen die Angaben aus Tab.1 und Tab.2 und Daten aus dem Anhang C.

Für die Berechnungen wurde vernachlässigt, daß eine Zugabe von Luminophoren die Oberfläche (den obersten Millimeter Sediment) verändert.

Ferner wurde auf Grund eines rasterelektronenmikroskopischen Vergleichs (Kap.2.3.) davon ausgegangen, daß Luminophoren gemäß ihrem prozentualen Anteil genau wie unmarkierte Partikel transportiert werden.

4.2.2. Bioturbationsbedingte Sedimentumlagerungen bei einem in situ Experiment in der Kieler Bucht

Die Experimente von Mahaut & Graf (1987) und Powilleit (1988) sowie die meisten hier beschriebenen mit Luminophoren durchgeführten Bioturbationsversuche fanden in Hälterungsanlagen (Forster 1991) unter Laborbedingungen statt. Im Bioturbationsexperiment in der Kieler Bucht konnte die Luminophorenmethode auch erfolgreich in situ eingesetzt werden. Es sind zwar ein großer organisatorischer Aufwand und eine sehr genaue Versuchsplanung für die Taucheinsätze nötig, aber das in Kap.2.6.4. beschriebene Experiment ließ sich mit Tauchern gut realisieren. Der Vorteil von in situ Experimenten besteht darin, daß die natürliche Situation am Boden (z.B. Strömung, Sedimentation von Plankton, große errante Organismen) möglichst wenig beeinflusst wird.

Das in situ Experiment in der Kieler Bucht gab Aufschluß über den Zeitablauf des Partikeleintrags in das Sediment und bestätigte Beobachtungen aus dem Zeitserienexperiment mit Sedimenten aus der Deutschen Bucht (Kap.3.3.1.), die dort aber auf Grund von Standardabweichungen nur sehr schwer zu bewerten waren.

So wird unter in situ Bedingungen (wie auch im Zeitserienexperiment) von vereinzelt Luminophoren zum ersten Probennahmetermin die maximale Eindringtiefe erreicht. Nach den bisherigen Beobachtungen wird die maximale Eindringtiefe der Partikel schon nach 2 bis 6 Tagen erreicht. Daraus ist zu schließen, daß zumindest ein Teil des Partikeleintrags ins Sediment an das Vorhandensein von Gängen gebunden ist. Einerseits können sedimentierende Partikel direkt in Gangöffnungen fallen; andererseits werden Partikel aus der oberflächennahen Schicht durch im Sediment wühlende Tiere in Gänge befördert.

Mit fortschreitender Dauer des in situ Experiments war zu beobachten, daß die Luminophorenkonzentration in der Oberflächenschicht abnahm und sich bei einzelnen Kornfraktionen in unterschiedlichen Tiefen Maxima ausbildeten. Diese Beobachtung deutet auf einen zweiten Transportmechanismus, einen selektiven Partikeleintrag durch im Sediment lebende Organismen, hin (Mahaut & Graf 1987).

In Tab.4 sind für das in situ Experiment in der Kieler Bucht die Nettosedimenteinträge für die einzelnen Korngrößen innerhalb von 6 Tagen zusammengestellt.

Tab.4 Sedimentumlagerung aus dem 1 mm in die Tiefe
in situ Experiment in der Kieler Bucht

Korngröße [µm] Luminophoren- farbe	Eindring- tiefe [cm]	Partikel- zahl [n] pro Kern	Sedimenttransport pro Fläche x Zeit [g m ⁻² 6 d ⁻¹]
500-1000	tiefer 0.5	1356	94.22
Blau	" 1	560	39.47
	bis in 7-8	73	5.09
250-500	tiefer 0.5	15534	134.96
Rot	" 1	6730	58.57
	bis in 2-3	506	3.82
125-250	tiefer 0.5	187000	230.45
Gelb	" 1	78585	96.76
	bis in 7-8	4452	5.09
63-125	tiefer 0.5	159669	30.56
Grün	" 1	60415	11.59
	bis in 7-8	8631	1.66
Σ aller	tiefer 0.5		490
Fraktionen	" 1		206

Zur Berechnung dienten Angaben aus Tab.1 und Tab.2. sowie die Daten aus dem Anhang D.

4.2.3. Temperaturabhängigkeit der Bioturbationsleistung von *Nereis diversicolor*

Bei einer Überprüfung des Einflusses der Temperatur auf die Wühltätigkeit von *Nereis diversicolor* im Labor-experiment lassen sich aus den Ergebnissen mehrere Schlüsse ziehen.

Ein direkter Einfluß der Temperatur auf die Tiere und damit ihre Bioturbationsleistung läßt sich aus diesem Experiment meines Erachtens nicht ableiten. So ist zwar der Luminophoreneintrag bei 4°C am effektivsten, aber eine Abnahme der Effektivität umgekehrt proportional zur Temperatur läßt sich in diesem Versuch nicht nachweisen: bei 16°C werden mehr Partikel eingearbeitet als bei 8°C. Ähnliche Verhältnisse beobachtete Kitlar (1991) in Parallelversuchen beim Flüssigkeitstransport. Ein Erklärungsansatz ist, daß die 4°C den im Februar und März 1990 im Freiland herrschenden Bedingungen am nächsten kamen und die Tiere unter quasinatürlichen Bedingungen auf einen Nahrungspuls reagieren konnten. Bei 8°C und 16°C reichte 1 Woche Adaptation möglicherweise nicht aus, und die Tiere waren einer Stresssituation ausgesetzt, die sie nicht optimal auf das Futter reagieren ließ. Bei 16°C war die Temperatur dann so hoch, daß durch vermehrte mikrobiologische Aktivitäten in den tieferen Sedimentschichten anoxische Verhältnisse auftraten (Schwarzfärbung ehemals hellen Sediments). Durch diese anoxischen Verhältnisse wurden die Tiere in den oberen Sedimentschichten zu vermehrter Bewegung gezwungen, um ihren Sauerstoffbedarf zu decken.

Ferner scheint der Partikeleintrag ins Sediment deutlich schneller zu geschehen als bisher angenommen. In diesem Experiment wurde in vielen Fällen schon nach 2 Tagen die maximale Eindringtiefe der Partikel erreicht. Damit werden ähnliche Beobachtungen vom Vøringplateau aus der Norwegischen See (Graß & Teucher unveröffentlicht) bestätigt. Auch Powilleit (1988) registrierte bei seinen Versuchen innerhalb von 3 Stunden bis zu 3 Tagen nach Versuchsbeginn die größten Partikeleinträge, aber hier wurden die Versuchstiere erst nach Zugabe der Luminophoren eingesetzt.

Im 4°C-Versuch fiel bei den roten Luminophoren auf, daß bei einem Vergleich der 4 untersuchten Zeitpunkte am Anfang (nach 2 Tagen) die maximale Eindringtiefe erreicht wurde. Gleichzeitig hatte die Konzentration der Luminophoren in der Oberflächenschicht ihr Minimum. Mit fortschreitender Experimentdauer konnte eine "Rückmischung" beobachtet werden: die Luminophoren sammelten sich wieder in der Oberflächenschicht, und die Eindringtiefe ging zurück. Auch dieses Phänomen konnte an gehälterten Sedimentkernen vom Vøringplateau beobachtet werden (Graf & Teucher unveröffentlicht). Erklären ließe sich diese Partikelbewegung damit, daß die im Sediment lebende Fauna bei einem Nahrungspuls alles erreichbare Material schnellstmöglich in ihre Gänge zieht (Vorratshaltung) und erst zu einem späteren Zeitpunkt frißt, verdaut und die Ausscheidungen wieder an die Oberfläche befördert.

In Tab.5 sind für das Temperaturexperiment mit Sediment aus dem Odensefjord die Nettosedimenteinträge für die einzelnen Korngrößen innerhalb von 2 Tagen zusammengestellt.

**Tab.5 Sedimentumlagerung aus dem 1 mm in die Tiefe
im Experiment zur Temperaturabhängigkeit der
Bioturbationsleistung von *Nereis diversicolor***

Korngröße [µm] Luminophoren- farbe	Eindring- tiefe [cm]	Partikel- zahl [n] pro Kern	Sedimenttransport pro Fläche x Zeit [g m ⁻² 2d ⁻¹]
500-1000	tiefer 1	2522	175.70
Blau 4° C	bis in 8-9	90	6.37
500-1000	tiefer 1	318	21.64
Blau 8° C	bis in 6-7	3	0.2
500-1000	tiefer 1	2090	146.42
Blau 16° C	bis in 6-7	522	36.92
250-500	tiefer 1	23630	204.99
Rot 4° C	bis in 6-7	1681	14.01
250-500	tiefer 1	1818	15.28
Rot 8° C	bis in 2-3	1039	8.91
250-500	tiefer 1	13297	114.59
Rot 16° C	bis in 1-2	13297	114.59
125-250	tiefer 1	303100	373.05
Gelb 4° C	bis in 7-8	3236	3.82
125-250	tiefer 1	30218	36.92
Gelb 8° C	bis in 3-4	9667	11.46
125-250	tiefer 1	132435	162.97
Gelb 16° C	bis in 1-2	132435	162.97
Σ aller Fraktionen bei 4° C	tiefer 1 cm		754
Σ aller Fraktionen bei 8° C	tiefer 1 cm		74
Σ aller Fraktionen bei 16° C	tiefer 1 cm		424

Zur Berechnung dienten Angaben aus Tab.1 und Tab.2. so-
wie die Daten aus dem Anhang E.

4.3. Die Bedeutung des bioturbaten Partikeltransports für die Schadstoffablagerung

Die Verfügbarkeit von Schwermetallen im marinen System ist davon abhängig, ob diese in löslichen oder unlöslichen Verbindungen vorliegen. Unter oxidierten Verhältnissen sind z.B. Cadmium, Zink, Kupfer und Nickel löslich; verlassen sie den oxischen Sedimentbereich, so gehen sie in geringlösliche Metallsulfide über. Damit ist es von großem Interesse, wie schnell wie viele Partikel - Schadstoffe sind überwiegend an Partikel gebunden - aus den oberflächlichen, oxidierten Horizonten in sauerstofffreie, tiefere Regionen transportiert werden.

Forster (1991) stellte bei seinen Untersuchungen an Sedimenten von der Station Schlicksandgrund aus der Deutschen Bucht fest, daß die größte Änderung des Eh-Potentials und eine damit verbundene Abnahme des Sauerstoffgehalts überwiegend im ersten Zentimeter des Sediments stattfindet. Dies bedeutet, daß alle Schadstoffe, die tiefer als 1 cm ins Sediment eingegraben werden, in sauerstofffreie Regionen gelangen.

Der Anteil der für die Schadstoffablagerung wichtigsten Fraktion $\leq 20 \mu\text{m}$ (Kersten & Krönke 1990) beträgt 8.6% (etwa $102 \text{ g mm}^{-1} \text{ m}^{-2}$) auf der Station Schlicksandgrund in der Deutschen Bucht (Bendler pers. Mitteilung).

Da das Verhalten dieser Korngrößenfraktion nicht mit Luminophoren dargestellt werden konnte, wird für eine Abschätzung des Partikeltransports angenommen, daß 100% dieser Fraktion bewegt werden. Diese Annahme wird gemacht, weil die Fraktion $\leq 20 \mu\text{m}$ selektiv von Detritus- und Suspensionsfressern aufgenommen wird und nach Tab.2 und Tab.3 die Kornfraktionen mit abnehmender Größe vermehrt transportiert werden. Vermutlich werden 60-80% dieser Fraktion auch tiefer als 1 cm ins Sediment eingearbeitet. Dies bedeutet, daß 60-80 g belastetes Sediment auf jeden Fall zeitweilig in sauerstofffreie Sedimenthorizonte gelangt. Bei 70 g transportiertem Sediment pro m^2 würden dann 11.8 mg Zn, 6.9 mg Cr, 5.7 mg Pb, 3.6 mg Ni, 2.5 mg Cu, 1.6 mg As, 0.04 mg Hg

und 0.03 mg Cd tiefer als 1 cm ins Sediment eingegraben (Kersten et al 1990). Dieser in die Tiefe gerichtete Transport erfolgt sehr wahrscheinlich innerhalb von 2-3 Tagen nach Sedimentation der Partikel. Faßt man für die Station Schlicksandgrund in der Deutschen Bucht die Angaben aus Tab.3 und jene über die Fraktion $\leq 20 \mu\text{m}$ zusammen, so erhält man einen Sedimenttransport von etwa 720 g tiefer 0.5 cm und etwa 450 g tiefer 1 cm innerhalb von 2-3 Tagen. Da eine noch höhere zeitliche Auflösung nicht möglich war, kann der Sedimenttransport pro Tag mit mindestens 240-360 g tiefer 0.5 cm und wenigstens 150-225 g tiefer 1 cm abgeschätzt werden.

Mit großer Sicherheit wird auch in der Deutschen Bucht - wie in Experimenten beobachtet - ein Rücktransport von Partikeln in oberflächennahe Schichten vorhanden sein. Diese Prozesse können zu einer erneuten Freisetzung von Schadstoffen führen.

Als Ansatz zur Erklärung der beobachteten Partikelbewegung wurde folgendes Modell entwickelt:

Zum einen gibt es eine ungerichtet durchmischte Oberflächenschicht. Diese ist in den Laborexperimenten mit 2-5 mm anzunehmen. Unter Laborbedingungen waren *Diastylis ratkei* und *Ophiura albida* die wesentlichen Bioturbatoren; im Freiland ist diese Schicht stärker und es kommen Crustaceen und bodenlebende Fische als weitere Verursacher dazu.

Der wesentliche Partikeltransport in die Tiefe durch eine Redoxsprungschicht erfolgt aber entlang von Gängen. Dies kann einerseits dadurch geschehen, daß Partikel absichtlich von im Boden lebenden Tieren in die Bauten befördert werden, andererseits aber auch auf ungerichtete Verwühlungen in der Oberflächenschicht zurückzuführen sein, durch welche das Sediment in Gangöffnungen stürzen kann. Diese, in tiefere Horizonte gelangten Partikel werden - in biologisch relevanten Zeiträumen von Tagen oder wenigen Wochen - zu einem geringen Teil durch Verdrängung und Kompressionen ins umgebende Sediment eingearbeitet. Der überwiegende Teil der Partikel muß aber aus Gründen des Gleichgewichts wieder entlang der Gänge an die Oberfläche transportiert werden. Wäre dies

nicht so, so müßte man im Verlauf des Experiments eine zunehmende Luminophorenkonzentration in der Tiefe vorfinden und keinen erneuten Konzentrationsanstieg in der Oberflächenschicht. Das bedeutet: Partikeleintrag aus der Sedimentoberfläche in die Tiefe und Rücktransport zur Oberfläche müssen annähernd gleich groß sein.

Für die Metalle Cadmium, Zink, Kupfer und Nickel bedeutet dies: Sie bleiben lange in löslicher Form und liegen nur gelegentlich als schlecht lösliche Sulfide vor. Sie können nur in geologischen Zeiträumen durch Sedimentation von nicht kontaminiertem Material festgelegt werden.

Abschließend läßt sich feststellen, daß dieses Bio-turbationsmodell auch die Altersbestimmungen von Sedimenten mittels radioaktiver Isotope (z.B. Berger & Johnson 1978, Erlenkeuser 1980) bestätigt. Die sedimentierenden Partikel (Isotope) bleiben, von einigen "Ausflügen" in ältere Horizonte abgesehen, im wesentlichen in ihrer Ablagerungsschicht.

5. Literatur

- Aller, R.C.; 1978: The effects of animal-sediment interactions on geochemical processes near the sediment-water interface. in: Wiley, M.L. ed, Estuarine Interactions, Academic Press, New York.
- Aller, R.C.; 1982: The effects of macrobenthos on chemical properties of marine sediment and overlying water. in: McCall, P.L. & Tevesz, M.J.S. eds., Animal-Sediment Relations, Plenum Press, New York.
- Berger, W.H. & Heath, G.R.; 1968: Vertical mixing in pelagic sediments. J.Mar.Res. 26, 134-143.
- Berger, W.H. & Johnson, R.F.; 1978: On the thickness and the ^{14}C age of the mixed layer in deep-sea carbonates. Earth and Planetary Science Letters 41, 223-227.
- Boudreau, B.P.; 1986: Mathematics of tracer mixing in sediments. I. Spatially-dependent, diffusive mixing. American Journal of Science 286, 161-198.
- Dries, R.R. & Theede, H.; 1974: Sauerstoffmangelresistenz mariner Bodenevertebraten aus der westlichen Ostsee. Mar.Biol. 25, 327-333.
- Eisma, D. & Irion, G.; 1988: Suspended matter and sediment transport. in: Salomons, W., Bayne, B.L., Duursma, E.K. & Förstner, U. (eds.), Pollution of the North Sea, An Assessment, Springer Verlag.
- Erlenkeuser, H.; 1980: ^{14}C age and vertical mixing of deep-sea sediments. Earth and Planetary Science Letters 47, 319-326.

- Eversberg, U.; 1990: Abbau und Akkumulation von organischer Substanz in den Sedimenten der Kieler Bucht.
Berichte aus dem IfM Nr. 193.
- Forster, S.; 1991: Die Bedeutung biogener Strukturen für den Sauerstofffluß ins Sediment.
Diss.Universität Kiel.
- Graf, G.; 1989a: Benthic-pelagic coupling in a deep-sea benthic community.
Nature 341, 437-439.
- Graf, G.; 1989b: Die Reaktion des Benthals auf den saisonalen Partikelfluß und die laterale Advektion, sowie deren Bedeutung für Sauerstoff- und Kohlenstoffbilanzen.
- Guinasso, N.L. & Schink, D.R.; 1975: Quantitative estimates of biological mixing rates in abyssal sediments.
J.Geophys.Res. 80(2), 3032-3043.
- Hagmeier, A.; 1925: Vorläufiger Bericht über die vorbereitenden Untersuchungen der Bodenfauna der Deutschen Bucht mit dem Petersen-Bodengreifer.
Ber.dt.wiss.Kommn Meeresforsch. N.F.1, 247-272.
- Hagmeier, E. & Bauerfeind, E.; 1990: Phytoplankton.
in: Warnsignale aus der Nordsee
Ed.: J.L.Lozañ, W.Lenz, E.Rachor, B.Watermann,
H.v.Westernhagen; Verlag Paul Parey.
- Hickel, W., Bauerfeind, E., Niermann, U. & v.Westernhagen, H.;
1989: Oxygen deficiency in the south-eastern north sea: sources and biological effects.
Ber.Biol.Anst.Helgoland 4, 1-144.
- Hoeg, S. & Voigt, G.; 1967: Über die Haltbarkeit von lumineszierenden Markierungen auf Sandkörnern.
Gerlands Beiträge zur Geophysik 76, 497-512.

Krause, M.; 1990: Zooplankton.

in: Warnsignale aus der Nordsee

Ed.: J.L.Lozañ , W.Lenz, E.Rachor, B.Watermann,
H.v.Westernhagen; Verlag Paul Parey.

JEFFREY, S.W. & HUMPHREY, G.F.; 1975: New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1, and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. Biochem. Physiol. Pflanzen (BPP) 167,

Kerstern, M., Förstner, U., Calmano, W. & Ahlf, W.; 1985: Freisetzung von Metallen bei der Oxidation von Schlämmen - umwelttechnische Aspekte der Baggergutdeponierung. Vom Wasser 65, 21-35.

Kerstern, M. & Krönke, I.; 1990: Schwermetalle in den Sedimenten. in: Warnsignale aus der Nordsee
Ed.: J.L.Lozañ , W.Lenz, E.Rachor, B.Watermann,
H.v.Westernhagen; Verlag Paul Parey.

Kersten, M., Kienz, W., Koellin, S., Schröder, M. & Förstner, U.; 1990: Schwermetallbelastung in Schwebstoffen und Sedimenten der Nordsee. Vom Wasser 75, 245-272.

Kitlar, J.; 1991: Der Einfluß der Bioturbation auf den Transport gelöster Stoffe im Porenwasser. Diss. Univ. Kiel

Lowry, O.H., Rosebrough, N.J., Farr, A.L., & Randall, R.J.; 1951: Protein measurement with the Folin Phenol Reagent. J.Biol.Chem 193, 265-275.

Mahaut, M.-L. & Graf, G.; 1987: A luminophore tracer technique for bioturbation studies. Oceanologica Acta 10(3), 323-328.

- Matisoff, G.; 1982: Mathematical models of bioturbation.
in: McCall, P.L. & Tevesz, M.J.S. eds., Animal-Sediment Relations, Plenum Press, New York.
- McCall, P.L. & Tevesz, M.J.S.; 1982: The effects of benthos on physical properties of freshwater sediments.
in: McCall, P.L. & Tevesz, M.J.S. eds., Animal-Sediment Relations, Plenum Press, New York.
- Nachtigall, K.H.; 1964: Ein Gerät zur automatischen Zählung von Luminophoren.
Meyniana 14, 48-51.
- Povolledo, D. & Gerletti, M.; 1964: Studies on the sedimentary acid soluble organic matter from Lake Maggiore (North Italy).
Mem.Ist.Ital.Idrobiol.17, 115-150.
- Powilleit, M.; 1988: Die Bioturbationsleistung des Priapuliden *Halicryptus spinolosus* in der Kieler Bucht.
Diplomarbeit Univ. Kiel.
- Radach, G., Schönfeld, W. & Lehnhart, H.; 1990: Nährstoffe in der Nordsee - Eutrophierung, Hypertrophierung und deren Auswirkungen
in: Warnsignale aus der Nordsee
Ed.: J.L.Lozañ, W.Lenz, E.Rachor, B.Watermann,
H.v.Westernhagen; Verlag Paul Parey.
- Rhoads, D.C.; 1974: Organism-sediment relations on the muddy sea floor.
Oceanogr.Mar.Biol.Ann.Rev. 12, 263-300.
- Rosenberg, R.; 1980: Effect of oxygen deficiency on benthic macrofauna in fjords.
in: Fjord Oceanography
Ed.: H.J.Land, D.M.Farmer & C.D.Levings;
Plenum Publ.Co., New York.

- Ruck, K.W.; 1972: Erfahrungen beim präparieren von Sand für
Leitstoffuntersuchungen.
Mitt.Bl.d.BAW 33.
- Rumohr, H.; 1980: Der Benthosgarten in der Kieler Bucht -
Experimente zur Benthosökologie.
Reports SFB 95 Nr 55.
- Salzwedel, H., Rachor, E. & Gerdes, D.; 1985: Benthic Macrofauna
Communities in the German Bight.
Veröff.Inst.Meeresforsch.Bremerh.20, 199-267.
- Schwarzer, K.; 1989: Sedimentdynamik in Sandriffsystemen einer
tidefreien Küste unter Berücksichtigung von
Rippströmen.
Reports, Geol.-Paläont.Inst.Univ.Kiel, Nr 33.
- Striggow, K.; 1966: Automatische Zählung lumineszenter
Sandkörner.
Beiträge zur Meereskunde 17/18, 91-95.
- Stripp, K.; 1969: Die Assoziation des Benthos in der Helgoländer
Bucht.
Veröff.Inst.Meeresforsch.Bremerh.12, 95-142.
- Zenkovic, V.P.; 1958: Emploi des luminophores pour l'étude du
mouvement des alluvions sablonneuses.
Bull.d'Information du Comité Centr.d'Océanographie
Nr 10.

Tab. 1 Wassergehalte des Sediments der Stationen "Schlicksandgrund"
und "Schlickgrund" in der Deutschen Bucht in % vom Feuchtgewicht (FG)

Station Schlicksandgrund

Tiefe	April 88	Juni 88	Sept 88	Feb 89	Mai 89	Aug 89
cm	%	%	%	%	%	%
0.5	26.24	30.62	44.3	36.98	29.07	31.51
1.5	26.53	26.39	34.19	25.14	24.95	26.79
2.5	25.57	26.14	29.15	24.31	23.57	27
3.5	25.78	26.46	24.87	24.73	25.6	28.16
4.5	26.75	26.19	31.53	24.68	27.85	29.79
5.5	26.59	26.22	24.24	25.5	27.56	28.52
6.5	25.73	26.27	31.43	26.5	27.46	28.69
7.5	24.74	26.39	25.19	26.55	26.49	27.19
8.5	25.14	26.61	26.94	26.14	26.93	26.61
9.5	24.89	29.31	24.91	25.85	26.62	26.08
10.5	25.19	29.46	25.72	25.69	25.96	25.55
11.5	25.39	26.79	21.7	23.82	25.47	25.29
12.5	23.52	26.62	25.58	24.11	24.78	24.86
13.5	24	24.08	24.64	23.49	24.77	25.4
14.5	23.51	27.81		24.94	24.59	25.25

Station Schlickgrund

Tiefe	April 88	Juni 88	Sept 88	Feb 89	Mai 89	Aug 89
cm	%	%	%	%	%	%
0.5	51.07	59.97	77.52	61.73	67.28	80.3
1.5	50.17	49.7	75.87	59.09	52.85	73.41
2.5	50.6	45.1	63.85	56.56	50.26	73.56
3.5	55.58	45.19	46.65	55.6	42.21	73.89
4.5	58.59	43.94	54.24	56.24	52.48	74.09
5.5	59.74	49.25	58.06	59.45	45.47	71.92
6.5	60.52	53.75	62.2	47.71	46.04	70.6
7.5	56.15	57.37	64.17	54.12	54.59	69.91
8.5	52.33	60.93	67.27	50.63	53.77	65.62
9.5	44.24	61.59	60.98	48.77	47.7	67.77
10.5	48.16	65.24	62.77	40.32	51.89	65.2
11.5	54.41	63.63	58.8	45.05	57.8	60.78
12.5	57.83	57.59	57.91	50.54	59.14	55.18
13.5	53.16	56.63	59.23	49.67	53.08	47.81
14.5		55.34	46.72	41.43	50.91	48.37

Anhang A

Tab. 2 Kohlenstoffgehalte (ermittelt aus Glühverlusten) der
der Deutschen Bucht

Station Schlicksandgrund

Tiefe April 88			Juni 88		Sept 88		
cm	mg/cm3	s	mg/cm3	s	mg/cm3	s	
0.5	11.33	2.15	13.76	1.09	27.89	19.66	
1.5	13.57	3.71	14.66	2.2	22.72	8.96	
2.5	15.68	0.56	16.13	0.75	19.52	7.49	
3.5	16.15	1.78	17.38	1.52	16.33	1.63	
4.5	13.96	2.09	14.31	2.31	15.33	1.56	
5.5	15.79	0.82	14.78	3.02	16.53	2.57	
6.5	15.6	2.13	18.64	1.82	25.9	10.08	
7.5	15.24	2.24	13.97	3.01	19.46	0.68	
8.5	16.3	0.7	18.35	1.04	21.16	2.61	
9.5	14.18	2.39	20.49	4.07	27.56	16.08	
10.5	17.71	1.07	17.69	5.44	22.61	2.8	
11.5	15.07	2.6	18.11	1.52	19.9	5.17	
12.5	16.16	1.54	17.98	0.16	17.51	2.49	
13.5	16.8	1.96	15.39	4.14	21.84	2.71	
14.5	18.51	0	10.78	5.49			

Station Schlickgrund

Tiefe April 88			Juni 88		Sept 88		
cm	mg/cm3	s	mg/cm3	s	mg/cm3	s	
0.5	21.62	2.14	19.95	2.21	18.29	1.63	
1.5	19.69	5.39	20.77	2.28	20.97	1.54	
2.5	22.31	3.79	20.57	0.38	22.97	0.75	
3.5	23.59	3.46	22.68	1.14	21.74	4.19	
4.5	25.61	1.31	21.71	4.19	26.89	0.95	
5.5	26.77	2.95	26.32	1.32	27.86	3.2	
6.5	18.68	6.88	26.59	3.16	28.62	2.3	
7.5	22.96	2.82	27.2	1.79	31.18	9.82	
8.5	23.29	2.02	28.47	1.52	28.81	8.83	
9.5	22.17	3.52	28.2	1.08	36	11.53	
10.5	20.91	4.34	27.05	4.26	30.37	5.52	
11.5	25.84	0.13	26.09	3.2	34.81	5.65	
12.5	21.99	5.35	23.6	0.04	33.81	4.77	
13.5	21.78	0	26.33	0.56	28.24	7.24	
14.5			21.59	0	26.83	2.65	

Stationen "Schlicksandgrund" und "Schlickgrund" in

Feb 89		Mai 89		Aug 89	
mg/cm3	s	g/cm3	s	mg/cm3	s
13.79	2.68	11.45	0.82	11.76	0.67
10.85	1.53	9.16	2.64	13.22	0.97
12.2	3.11	9.69	0.96	14.27	2.69
12.5	3.17	12.65	1.65	12.76	2.9
12.42	0.81	12.78	1.03	17.5	2.3
13.35	4.34	14.12	3.62	13.47	5.38
15.38	1.19	15.03	1.35	16.34	2.31
13.59	2.5	14.27	2.56	14.93	1.7
14.57	1.61	17.55	1.11	15.62	1.38
15.63	2.7	14.87	4.76	16.35	1.14
18.12	2.63	16.63	1.18	15.92	1.26
14.43	2.86	16	1.34	15.29	3.37
14.62	3.84	14.65	3.01	17.99	2.64
15.43	0.64	13.38	3.69	15.84	1.15
15.24	0.96	15.77	4.14	16.92	0.97

Feb 89		Mai 89		Aug 89	
mg/cm3	s	mg/cm3	s	mg/cm3	s
18.77	2.41	15.49	2.46	14.91	3.07
21.28	3.52	15.33	3.06	19.61	1.91
22.45	1.66	15.39	0.67	21.4	2.43
21.36	1.59	17.31	4.63	22.42	0.43
22.77	4.41	19.03	2.43	20.82	2.65
24.81	3.57	19.53	4.63	21.6	2
21.85	0.58	22.3	3.78	24.19	3.15
22.28	1.61	28.58	0	21.03	4.25
21.29	5.19	24.12	4.83	23.6	0.9
22.8	5.99	25.43	5.56	17.93	7.88
17.09	4.7	25.66	4.19	30.61	10.79
16.28	6.52	26.55	0.46	20.66	5.08
21.62	2.51	23.6	6.35	19.95	3.55
23.84	1.76	28.98	1.77	20.1	5.15
22.65	4.43	25.06	2.53	23.15	2.65

Anhang A

Tab. 3 Proteingehalte der Stationen "Schlickaandgrund"
Station Schlickaandgrund

Tiefe April 88		Juni 88		Sept 88	
cm	mg/cm3	s	mg/cm3	s	mg/cm3
0.5	7.293	2.513	2	0.425	4.741
1.5	7.66	1.979	1.934	0.326	2.659
2.5	7.138	2.927	1.96	0.474	4.256
3.5	9.516	2.609	2.576	0.151	1.481
4.5	7.628	1.152	2.633	0.398	4.289
5.5	7.194	3.123	2.873	0.464	4.625
6.5	8.194	1.555	3.465	0.494	4.891
7.5	7.671	0.726	3.213	0.314	4.62
8.5	10.044	2.434	3.312	0.526	4.135
9.5	9.937	0.984	5.73	1.797	4.061
10.5	9.5	3.796	5.263	1.454	3.346
11.5	8.659	3.599	3.836	0.267	3.374
12.5	6.881	1.874	3.983	0.049	4.083
13.5	8.584	0.123	3.758	1.495	4.199
14.5	8.433	0.034	2.932	0.133	

Station Schlickgrund

Tiefe April 88		Juni 88		Sept 88	
cm	mg/cm3	s	mg/cm3	s	mg/cm3
0.5	21.408	3.534	7.864	3.622	19.467
1.5	27.468	5.821	8.889	0.738	18.227
2.5	29.771	5.532	9.365	2.517	11.459
3.5	39.392	8.978	6.921	2.157	7.421
4.5	37.964	6.23	14.197	8.256	13.835
5.5	42.44	3.942	15.001	2.851	19.737
6.5	34.301	23.757	13.812	5.221	18.766
7.5	36.723	5.748	11.806	3.651	20.493
8.5	34.643	7.278	17.598	10.301	19.659
9.5	27.922	9.764	20.71	0.442	22.877
10.5	30.334	13.158	19.195	4.774	21.365
11.5	34.867	9.897	14.706	5.539	20.523
12.5	37.88	1.17	16.306	6.458	22.47
13.5	47.77	0.314	16.522	10.428	25.074
14.5			19.989	4.721	16.874

" und "Schlickgrund" in der Deutschen Bucht

Feb 89		Mai 89		Aug 89	
s	mg/cm3	s	mg/cm3	s	mg/cm3
1.026	3.927	0.279	1.296	0.111	0.833
2.229	2.097	0.424	0.969	0.327	0.621
0.96	2.991	1.716	0.969	0.091	0.998
1.743	5.905	2.249	1.392	0.197	1.443
1.105	4.29	2.365	1.932	0.159	1.337
1.687	3.821	1.809	2.38	0.333	1.302
0.495	4.476	1.777	2.521	0.555	1.163
0.323	4.642	1.39	2.954	0.218	1.102
0.66	5.276	0.846	3.238	0.417	1.268
1.519	5.551	0.678	2.452	0.59	1.174
0.063	5.091	1.546	2.757	0.607	1.122
0.353	4.506	0.793	2.609	0.067	1.019
1.047	4.212	1.076	1.69	0.74	0.937
0.999	3.686	0.631	3.145	1.927	1.24
	4.258	0.427	2.569	0.782	1.657

Feb 89		Mai 89		Aug 89	
s	mg/cm3	s	mg/cm3	s	mg/cm3
7.166	13.977	3.01	9.682	4.618	8.181
1.078	15.619	4.442	6.667	1.973	9.577
6.972	18.844	2.816	7.565	2.351	9.748
3.078	13.933	3.185	4.793	1.364	10.108
1.873	13.294	2.566	7.593	0.726	16.073
4.125	18.546	0.679	6.741	5.215	9.533
2.001	10.993	2.808	8.032	2.437	9.907
2.244	7.542	3.097	12.079	1.35	9.732
1.291	13.169	4.896	13.363	2.168	8.243
4.128	10.025	3.583	11.443	4.47	9.919
2.953	11.217	7.587	15.385	0.255	8.371
1.5	12.957	3.952	14.493	2.331	8.233
3.005	17.437	4.875	14.772	3.059	5.388
0.919	6.898	8.243	10.064	4.901	4.765
5.548	14.788	2.135	8.963	6.142	4.886

Anhang A

Tab. 4 Chlorophyll-a-gehalte der Stationen "Schlicksandgrund"
Station Schlicksandgrund

Tiefe April 88			Juni 88		Sept 88	
cm	mg/m2	s	mg/m2	s	mg/m2	s
0.5	75.681	16.802	94.722	19.601	69.447	21.529
1.5	58.977	1.959	77.517	25.783	68.15	16.479
2.5	54.201	4.942	80.57	29.697	69.559	18.554
3.5	58.248	9.154	93.684	40.764	71.653	26.055
4.5	61.052	12.657	59.484	9.151	61.045	11.057
5.5	58.104	16.813	59.73	24.554	55.045	10.439
6.5	47.782	2.345	49.463	4.891	54.765	4.821
7.5	51.739	11.729	46.813	2.15	47.909	6.617
8.5	44.835	2.004	40.13	5.915	50.435	6.858
9.5	38.029	5.28	40.93	9.6	38.656	3.181
10.5	41.974	10.631	35.883	8.585	37.664	3.507
11.5	37.642	7.998	36.423	1.099	40.727	3.87
12.5	36.323	9.789	35.596	6.33	37.358	4.143
13.5	32.082	0.892	37.122	7.582	36.279	11.546
14.5			32.479	0.614		

Station Schlickgrund

Tiefe April 88			Juni 88		Sept 88		
cm	mg/m2	s	mg/m2	s	mg/m2	s	
0.5	103.272	12.653	168.874	21.135	66.695	25.574	
1.5	118.24	15.812	148.137	14.883	74.027	16.514	
2.5	133.616	14.357	123.609	24.385	78.873	8.524	
3.5	146.915	7.672	104.964	12.19	92.477	29.118	
4.5	155.855	18.347	142.828	20.39	132.319	12.075	
5.5	200.381	35.207	177.418	19.247	159.768	9.747	
6.5	231.543	86.142	141.594	38.303	179.443	53.261	
7.5	204.137	43.321	143.098	19.504	217.733	54.02	
8.5	181.108	16.542	163.757	39.628	1389.796	2127.332	
9.5	146.632	20.904	155.071	5.839	146.253	25.041	
10.5	154.308	21.497	155.32	24.178	139.343	4.472	
11.5	159.593	5.241000	172.049	13.19	129.455	16.065	
12.5	170.816	11.697	165.726	28.311	124.471	38.364	
13.5			159.993	25.712	100.158	29.69	
14.5			192.679	25.712	92.496	51.942	

" und "Schlickgrund" in der Deutschen Bucht

Feb 89		Mai 89		Aug 89	
mg/m2	s	mg/m2	s	mg/m2	s
53.81	9.125	101.448	32.756	85.7668	20.678
41.454	4.461	45.371	2.405	50.499	13.031
34.124	8.985	29.476	13.756	47.873	6.514
30.828	21.431	39.272	5.122	48.135	13.429
39.825	11.905	59.957	28.051	56.74	16.755
37.664	3.83	51.331	16.965	47.937	14.92
38.563	11.185	41.485	6.13	40.41	8.042
37.276	5.645	42.588	5.564	31.358	4.458
33.602	5.03	41.343	1.723	31.247	4.346
37.286	4.598	37.474	8.563	31.747	2.079
39.448	5.662	31.071	6.696	26.29	1.146
30.601	0.482	33.568	2.503	23.86	2.307
28.047	2.505	27.761	3.865	25.528	1.234
27.796	0.664	27.597	2.807	26.832	4.153
27.571	0.867	28.579	8.306	26.886	8.646

Feb 89		Mai 89		Aug 89	
mg/m2	s	mg/m2	s	mg/m2	s
118.517	20.561	459.579	166.557	166.502	20.376
116.478	8.535	178.772	84.397	207.842	15.987
120.046	12.485	112.744	23.442	235.134	10.902
134.823	20.075	90.992	34.801	242.341	20.577
143.851	23.529	134.002	28.841	235.332	15.415
153.293	12.695	147.125	41.801	232.197	5.34
118.283	4.674	157.429	26.741	230.943	2.747
117.784	18.275	166.006	20.998	244.24	25.626
154.178	36.232	169.304	58.062	215.104	24.65
178.876	32.526	130.757	21.421	220.389	31.623
133.86	22.532	114.329	27.469	230.096	17.151
133.542	21.799	110.79	22.266	213.462	10.867
147.128	94.669	103.312	23.597	133.858	119.076
135.35	19.826	124.06	20.57	178.704	43.028
149.02	24.554	107.874	28.467	150.837	67.769

Anhang A

Tab. 5 Auswertung der Ruhmorlot-Proben der
Station Schlickgrund

Tiefe	Corg	Prot	Chl	H2O
cm	mg/cm3	mg/cm3	mg/m2	%FG
1	23.13	14.525	121.423	56.86
3	22.88	21.423	161.972	71.43
5	25.87	21.685	191.494	67.78
7	24.88	17.512	339.978	62.55
9	23.53	11.515	174.375	46.3
11	25.16	16.934	209.344	53.18
13	21.44	12.18	145.808	45.27
15	21.21	13.439	93.303	46.92
17	27.66	15.224	124.551	51.8
19	28.55	15.127	114.258	47.15
21	27.27	15.865	98.721	44.07
23	26.79	17.04	117.151	48.52
25		20.243	119.602	
27	25.1	18.26	108.315	54.55
29	20.48	19.147	114.244	50.93
31	20.87	19.129	106.431	51.58
33	25.47	17.057	121.277	54.13
35	26.44	22.2	116.264	57.27
37	26.7	19.692	97.783	56.47
39	22.29	12.108	83.094	43.76
41		14.948	106.188	61.09
43	22.92	19.526	79.863	49.11
45	20.82	13.853	64.941	45.68
47	20.92	16.68	80.886	53.6
49	23.36	16.394	81.134	55.11

Ausfahrt im Oktober 1989

Schlicksandgrund

Corg	Prot	Chl	H2O
mg/cm3	mg/cm3	mg/m2	%FG
14.94	2.26	58.484	32.94
15.13	2.707	53.906	29.23
16.43	2.711	42.027	28.32
15.99	3.648	40.079	27.69
15.26	3.107	30.044	26.16
16.53	3.569	33.106	26
12.41	2.818	32.517	27.25
12.91	3.765	31.92	24.47
17.12	3.167	37.099	24.13
17.15	3.523	33.028	24.31
16	2.955	32.436	24.12
16.3	3.83	17.999	24.28
13.86	2.164	13.66	23.4
13.7	2.384	14.764	23.72
10.9	2.051	8.567	23.98
10.72	1.856	10.856	25.2
13.81	1.884	8.486	24.41
14.74	2.908	6.874	24.74
15.26	3.13	9.432	24.19
14.27	2.717	6.44	24.63
14.79	2.543	7.974	23.9
14.32	2.492	7.978	23.06
11.61	3.847	5.685	23.58
12.48	2.793	4.07	22.71

Anhang B

Tab. 1 Vergleich zwischen den vom Auge und der Maschine
gezählten Folien und den dazwischen verworfenen
Schichten

Blau

Tiefe	Schicht		Auge		Maschine		
	cm	n	s	n	s	n	s
0.5	1123.174	288.5354	501.2453	244.9984	131.1904	99.14658	
1.5	199.9206	227.3903	272.9348	133.6032	478.0952	174.4576	
2.5	29.76190	42.08968	197.1772	190.3857	261.4285	60.07931	
3.5	0	0	45.66210	64.57596	124.4444	175.9910	
4.5	7.222222	6.983225	151.5151	214.2747	120.7142	119.9503	
5.5	7.936507	6.827242	75.75757	107.1373	103.3333	146.1354	
6.5	1.190476	1.683587	0	0	0	0	
7.5	1.666666	2.357022	833.3333	1178.511	36.19047	51.18106	
8.5	1.666666	2.357022	0	0	0	0	
9.5	0	0	45.66210	64.57596	86.66666	122.5651	

Rot

Tiefe Schicht			Auge			Maschine		
cm	n	s	n	s	n	s		
0.5	1509.785	109.6046	1502.855	154.3696	1434.074	332.3805		
1.5	179.9097	125.8105	195.0056	114.6364	65.18518	92.18577		
2.5	29.43477	6.921161	49.01960	69.32419		0	0	
3.5	14.05778	9.817953		0		0	0	
4.5	6.937994	4.932775	17.82531	25.20879		0	0	
5.5	3.002425	1.535893		0		0	0	
6.5	5.124327	2.524229		0		0	0	
7.5	4.363281	2.548258		0		0	0	
8.5	10.09047	1.613087		0		0	0	
9.5	2.057471	2.240111		0		0	0	

Gelb

Tiefe Schicht			Auge			Maschine		
cm	n	s	n	s	n	s		
0.5	6156.605	314.1311	6265.029	641.1366	4005.555	2997.483		
1.5	931.6059	382.4697	718.5120	365.6352	801.1111	1132.942		
2.5	133.8001	10.93593	376.7405	294.6211	0	0		
3.5	67.71708	22.97281		0	0	0		
4.5	32.72642	9.723784	73.26007	103.6053		0		
5.5	39.35574	17.42820	29.23976	41.35127		0		
6.5	38.18860	21.52472		0	0	0		
7.5	33.59010	30.60965		0	0	0		
8.5	49.27637	9.235972		0	0	0		
9.5	10.94771	2.635345		0	0	0		

Anhang C

Luminophorendaten aus den Untersuchungen in der Deutschen Bucht
 Alle Werte sind um den entsprechenden Korrekturfaktor berichtigt
 und, ausgenommen die grünen Luminophoren, auf die zugegebene
 Luminophorenzahl hochgerechnet

Tab.1 Rote Luminophoren aus der Zeitserie beginnend am 28.10.88

Tiefe	30.10.		03.11.		07.11.		23.11.	
cm	n	s	n	s	n	s	n	s
0.25	4014	656.4942	3793.333	961.3131	4624.935	373.4835	1635.333	2312.710
0.75	446	481.7350		0	0	0	0 74.33333	105.1232
1.25	0		0	0	0	0	0 37.16666	52.56160
1.75	0		0	0	0	0	0	0
2.5	0		0	0	0	0	0	0
3.5	0		0	0	0	0	0	0
4.5	0		0	0	0	0	0	0
5.5	0		0	0	0	0	0	0
6.5	0		0	0	0	0	0	0
7.5	0		0	0	0	0	0	0
8.5	0		0	0	0	0	0	0
9.5	0		0	0	0	0	0	0

Tab.2 Gelbe Luminophoren aus der Zeitserie beginnend am 28.10.88

Tiefe	30.10.		03.11.		07.11.		23.11.	
cm	n	s	n	s	n	s	n	s
0.25	39416.66	29496.73	54657.77	19664.48	62531.72	3145.530	21285	30101.53
0.75	22861.66	25642.04		0	0	0	0 15856.66	22424.71
1.25	0		0	0	0	0	0 788.3333	1114.871
1.75	0		0	0	0	0	0 788.3333	1114.871
2.5	0		0	0	0 1576.666	2229.743		0
3.5	0		0	0	0	0	0	0
4.5	0		0 1576.666	2229.743		0	0 788.3333	1114.871
5.5	0		0 1576.666	2229.743	1576.666	2229.743		0
6.5	0		0	0	0	0	0	0
7.5	0		0	0	0	0	0	0
8.5	1576.666	2229.743		0	0	0	0	0
9.5	0		0	0	0	0	0	0

Anheng C

Tab.3 Grüne Luminophoren aus der Zeiteerie beginnend am 28.10.88

Tiefe	30.10.			03.11.			07.11.			23.11.		
cm	n	s		n	s		n	s		n	s	
0.25		37.84	15.44811	53.60666	35.88432		203.39	91.06529	22.07333	21.27039		
0.75	1.576666	2.229743		14.19	13.92474	1.576666	2.229743	11.03666	15.60820			
1.25	1.576666	2.229743	3.153333	2.229743	7.883333	11.14871	9.46	7.724057				
1.75	1.576666	2.229743	6.306666	4.459486	4.73	3.862028	3.153333	2.229743				
2.5	3.153333	2.229743		0	0	14.19	16.83419	7.883333	11.14871			
3.5	4.73	6.689230	6.306666	5.899346	3.153333	2.229743	3.153333	4.459486				
4.5		0	0	25.22666	28.98666	3.153333	2.229743		0	0		
5.5	4.73	3.862028		0	0	7.883333	11.14871		0	0		
6.5	4.73		0	7.883333	8.039454	4.73		0	6.306666	4.459486		
7.5	1.576666	2.229743	1.576666	2.229743		0		0	7.883333	8.039454		
8.5	3.153333	4.459486	3.153333	4.459486		0		0	0	0		
9.5	3.153333	2.229743		0	0	0		0	0	0		

Anhang C

Der Jahresgang auf der Station Schlicksandgrund wird für den Oktober 1988 aus den Tab.1-3 mit den Daten vom 07.11.1988 ergänzt. Für den Oktober 1989 sind die Daten aus Tab.6 oxisch zu ergänzen.

Tab.4a Jahresgang auf der Station Schlicksandgrund für rote Luminophoren

Tiefe	Feb89		Mai89		Aug89	
cm	n	s	n	s	n	s
0.25	2787.5	1672.5	3530.833	606.1699	0	0
0.75	1115	1115	0	0	0	0
1.25	0	0	74.33333	105.1232	743.3333	1051.232
1.75	0	0	0	0	0	0
2.5	0	0	0	0	0	0
3.5	0	0	0	0	743.3333	1051.232
4.5	0	0	0	0	0	0
5.5	0	0	0	0	1115	1576.848
6.5	0	0	0	0	0	0
7.5	0	0	0	0	0	0
8.5	0	0	0	0	0	0
9.5	0	0	0	0	0	0

Tab.4b Jahresgang auf der Station Schlicksandgrund für gelbe Luminophoren

Tiefe	Feb89		Mai89		Aug89	
cm	n	s	n	s	n	s
0.25	26803.33	11036.66	80635.23	39942.78	7883.333	11148.71
0.75	20496.66	11036.66	0	0	0	0
1.25	4730	4730	2252.380	3185.347	0	0
1.75	0	0	0	0	7883.333	11148.71
2.5	0	0	2252.380	3185.347	0	0
3.5	7883.333	7883.333	0	0	23650	19310.14
4.5	0	0	2252.380	3185.347	0	0
5.5	4730	4730	0	0	0	0
6.5	0	0	0	0	0	0
7.5	0	0	0	0	0	0
8.5	0	0	0	0	0	0
9.5	0	0	0	0	0	0

Anhang C

Tab.4c Jahresgang auf der Station Schlicksandgrund für grüne Luminophoren

Tiefe	Feb89		Mai89		Aug89	
cm	n	s	n	s	n	s
0.25	9.46	4.73	16.26333	15.60820	0	0
0.75	14.19	14.19	1.576666	2.229743	1.576666	2.229743
1.25	2.365	2.365	9.46	13.37846	4.73	6.689230
1.75	26.015	21.285	9.46	3.862028	0	0
2.5	0	0	11.03666	9.710226	0	0
3.5	2.365	2.365	1.576666	2.229743	0	0
4.5	0	0	9.46	3.862028	9.46	13.37846
5.5	0	0	6.306666	4.459486	0	0
6.5	0	0	1.576666	2.229743	0	0
7.5	2.365	2.365	1.576666	2.229743	0	0
8.5	2.365	2.365	1.576666	2.229743	0	0
9.5	4.73	4.73	0	0	6.306666	8.918973

Tab.5a Jahresgang auf der Station Schlickgrund für rote Luminophoren

Tiefe	Feb89		Mai89		Aug89	
cm	n	s	n	s	n	s
0.25	1226.5	1003.5	1923.375	1923.375	0	0
0.75	1115	1115	27.875	27.875	836.25	836.25
1.25	0	0	0	0	1672.5	0
1.75	0	0	0	0	1393.75	836.25
2.5	0	0	0	0	278.75	278.75
3.5	0	0	0	0	0	0
4.5	0	0	0	0	0	0
5.5	0	0	0	0	0	0
6.5	0	0	0	0	0	0
7.5	2676	2676	0	0	0	0
8.5	0	0	0	0	0	0
9.5	0	0	0	0	0	0

Anhang C

Tab.5b Jahresgang auf der Station Schlickgrund für gelbe Luminophoren

Tiefe	Feb89		Mai89		Aug89	
cm	n	s	n	s	n	s
0.25	7095	7095	42570	18920	0	0
0.75	11825	11825	11825	11825	0	0
1.25	0	0	11825	11825	23650	23650
1.75	0	0	0	0	0	0
2.5	2365	2365	0	0	0	0
3.5	2365	2365	0	0	0	0
4.5	0	0	0	0	0	0
5.5	0	0	0	0	0	0
6.5	7095	7095	0	0	0	0
7.5	0	0	0	0	0	0
8.5	0	0	0	0	0	0
9.5	0	0	0	0	0	0

Tab.5c Jahresgang auf der Station Schlickgrund für grüne Luminophoren

Tiefe	Feb89		Mai89		Aug89	
cm	n	s	n	s	n	s
0.25	11.825	7.095	33.11	9.46	9.46	9.46
0.75	70.95	70.95	9.46	9.46	7.095	2.365
1.25	14.19	14.19	0	0	9.46	9.46
1.75	2.365	2.365	2.365	2.365	0	0
2.5	4.71	4.71	4.73	4.73	0	0
3.5	9.46	9.46	11.825	2.365	16.555	16.555
4.5	2.365	2.365	4.73	4.73	4.73	4.73
5.5	0	0	2.365	2.365	2.365	2.365
6.5	47.3	42.57	4.73	4.73	0	0
7.5	7.095	7.095	0	0	11.825	11.825
8.5	0	0	2.365	2.365	0	0
9.5	0	0	0	0	0	0

Anhang C

Tab.6 Luminophorandenaten aus dem Experiment einer simulierten Sauerstoffmangel-situation

Note Luminophoren

Tiefe oxisch		hypoxisch		regeneriert	
cm	n	n	s	n	s
0.25	2694.583	1935.791	3450.5	1049.917	2073.333
0.75	92.91666	131.484	148.6666	210.2464	0
1.25	92.91666	131.484	74.33333	105.1232	0
1.75	0	0	74.33333	105.1232	0
2.5	0	0	0	0	0
3.5	0	0	0	0	0
4.5	0	0	0	0	0
5.5	0	0	0	0	0
6.5	0	0	0	0	0
7.5	0	0	0	0	0
8.5	0	0	0	0	0
9.5	0	0	0	0	0

Gelbe Luminophoren

Tiefe oxisch		hypoxisch		regeneriert	
cm	n	n	s	n	s
0.25	17737.5	13772.45	50548.68	19117.16	40205
0.75	23650	19316.14	11825	16733.97	0
1.25	929.1666	1314.04	0	0	0
1.75	0	0	0	0	0
2.5	0	0	0	0	0
3.5	0	0	0	0	0
4.5	1970.833	2787.179	0	0	1576.666
5.5	0	0	0	0	2239.743
6.5	0	0	0	0	0
7.5	0	0	0	0	1970.833
8.5	0	0	0	0	2089.863
9.5	0	0	0	0	394.1666
					557.4358
					0
					551.8333
					485.9613
					0

Anhang C

Grüne Luminophoren

Tiefe oxisch			hypoxisch			regeneriert		
cm	n	s	n	s		n	s	
0.25	14.19	10.21796	14.19	6.68923	20.49666	19.05093		
0.75	7.883333	4.459486	6.306666	8.918973	9.46	10.21796		
1.25	6.306666	4.459486	1.576666	2.229743	1.576666	2.229743		
1.75	3.153333	2.229743	3.153333	2.229743	3.153333	2.229743		
2.5	4.73	6.68923	0	0	1.576666	2.229743		
3.5	3.153333	2.229743	4.73	0	4.73	3.862028		
4.5	18.92	20.06769	0	0	3.153333	2.229743		
5.5	3.153333	2.229743	3.153333	2.229743	3.153333	4.459486		
6.5	3.153333	2.229743	4.73	6.68923	4.73	3.862028		
7.5	4.73	3.862028	3.153333	2.229743	3.153333	2.229743		
8.5	0	0	14.19	20.06769	4.73	6.68923		
9.5	0	0	0	0	1.576666	2.229743		

Anhang D

Luminophorendaten aus dem Hausghartanexperiment in der Kieler Bucht
 Alle Werte sind um den entsprechenden Korrekturfaktor berichtigt und,
 ausgenommen die grünen Luminophoren, auf die zugegebene Luminophorenzahl
 hochgerechnet

Tab.1 Blaue Luminophoren (500-1000 µm)

Tiefe 06.06.88			15.06.88		30.06.88		09.08.88	
cm	n	s	n	s	n	s	n	s
0.25	1330.098	191.1767	308.5063	42.54631	196.6279	78.32667	293.62	38.3
0.75	236.7427	55.35526	413.2126	157.3926	446.1640	155.3606	285.12	55.31999
1.25	39.14522	65.20772	197.0189	42.86105	410.0617	110.7933	110.64	68.08
1.75	26.92867	18.95367	100.34	44.34	178.4029	109.3367	97.36	29.78
2.5	13.58553	10.61053	49.28	6.720000	85.49365	6.374185	153.2	34.04000
3.5	6.338970	1.513970	58.91473	41.87473	34.46444	12.72339	119.14	25.53999
4.5	2.088235	2.088235	76.78	76.78	70.30730	46.90962	191.48	12.76000
5.5	2.088235	2.088235	12.76	12.76	249.2907	71.28172	378.72	123.4
6.5	29.59117	16.29117	59.58	59.58	41.78769	32.68450	119.14	119.14
7.5	26.18149	15.54399	42.56	42.56	123.2599	101.3376	68.08	68.08
8.5	0	0	0	0	0	0	0	0
9.5	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab.2 Rote Luminophoren (250-500 µm)

Tiefe 06.06.88			15.06.88		30.06.88		09.08.88	
cm	n	s	n	s	n	s	n	s
0.25	10184.33	2166.764	9728.5	1138.5	506	413.2472	4174.5	126.5
0.75	2201.1	328.9000	4427.5	2024	7210.5	4821.403	5313	759
1.25	1073.442	1022.842	1897.5	379.5	3987.666	309.5017	4427.5	2403.5
1.75	482.5071	457.2071	822.25	442.75	1054.166	568.8594	2403.5	1644.5
2.5	126.5	126.5	316.25	63.25	674.6666	362.7313	1391.5	632.5
3.5	0	0	63.25	63.25	126.5	178.8980	506	506
4.5	0	0	63.25	63.25	84.33333	119.2653	253	253
5.5	0	0	0	0	0	0	0	0
6.5	0	0	0	0	0	0	0	0
7.5	0	0	0	0	0	0	126.5	126.5
8.5	0	0	0	0	0	0	0	0
9.5	0	0	0	0	0	0	0	0

Anhang D

Tab.3 Gelbe Luminophoren (125-250 nm)

Tiefe	06.06.88		15.06.88		30.06.88		09.08.88	
cm	n	s	n	s	n	s	n	s
0.25	76327.16	8383.833	61710	5610	11220	8257.696	16830	16830
0.75	15178.16	2275.166	17297.5	2337.5	36776.66	10832.37	30955	8514.999
1.25	7667	5423	7246.25	233.75	27115	8670.833	22440	16830
1.75	1807.666	685.6666	7713.75	3506.25	6545	4767.583	9817.5	1402.5
2.5	592.1666	31.16666	0	0	1870	1322.289	8415	2805
3.5	311.6666	311.6666	0	0	5610	4580.545	1402.5	1402.5
4.5	0	0	0	0	0	0	8415	8415
5.5	0	0	0	0	0	0	1402.5	1402.5
6.5	0	0	0	0	0	0	0	0
7.5	623.3333	623.3333	0	0	0	0	0	0
8.5	0	0	0	0	0	0	0	0
9.5	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab.4 Grüne Luminophoren (63-125 nm)

Tiefe	06.06.88		15.06.88		30.06.88		09.08.88	
cm	n	s	n	s	n	s	n	s
0.25	319.82	28.09999	47.685	8.414999	11.22	7.933738	36.465	36.465
0.75	64.515	8.415000	22.44	5.61	48.62	33.76372	25.245	2.805
1.25	14.025	8.415	5.61	5.61	46.75	25.22767	28.05	5.610000
1.75	2.805	2.805	14.025	2.805000	14.96	21.15663	30.855	14.025
2.5	8.415	2.805	5.61	5.61	0	0	5.61	0
3.5	5.61	0	0	0	1.87	2.644579	16.83	0
4.5	2.805	2.805	0	0	0	0	8.415	8.415
5.5	0	0	0	0	0	0	2.805	2.805
6.5	0	0	0	0	0	0	0	0
7.5	5.61	5.61	0	0	3.74	2.644579	2.805	2.805
8.5	0	0	0	0	0	0	0	0
9.5	0	0	0	0	0	0	0	0

Anhang E

Luminophorendaten aus dem Temperaturexperiment mit *Nereis diversicolor*
 Alle Werte sind um den entsprechenden Korrekturfaktor berichtigt und auf die
 zugegebene Luminophorenzahl hochgerechnet

Tab.1 Blaue Luminophoren (500-1000 µm) bei 4°C, 8°C und 16°C

Tiefe	4°C, 2 Tage		5 Tage		9 Tage		15 Tage	
0.5	523.7486	287.0622	375.9534	202.3174	227.2727	321.4121	501.2453	244.9984
1.5	207.1005	207.1005	305.3494	28.13541	378.7878	386.2893	272.9348	133.6032
2.5	359.0276	181.5128	176.7676	198.8385	263.8674	296.4642	197.1772	190.3857
3.5	118.3431	118.3431	75.75757	107.1373	188.7519	141.0443	45.66210	64.57596
4.5	0	0	0	0	94.37596	70.52217	151.5151	214.2747
5.5	88.75739	88.75739	45.35147	64.13666	75.75757	107.1373	75.75757	107.1373
6.5	29.58579	29.58579	83.23026	59.56005	56.49717	79.89907	0	0
7.5	0	0	95.85652	68.07404	75.75757	107.1373	833.3333	1178.511
8.5	29.58579	29.58579	111.0595	34.13247	0	0	0	0
9.5	0	0	68.02721	96.20500	0	0	45.66210	64.57596

Tiefe	8°C, 2 Tage		5 Tage		9 Tage		15 Tage	
0.5	582.1528	574.3097	923.3298	228.1663	832.2605	264.4250	2942.091	2662.705
1.5	69.00760	67.04681	0	0	95.92326	135.6559	45.74934	39.83227
2.5	0.980392	0.980392	0	0	166.0986	66.61368	0	0
3.5	34.01360	34.01360	0	0	119.9040	89.72799	67.45017	47.81112
4.5	0	0	171.4397	140.7820	35.08771	49.62152	35.08771	49.62152
5.5	0	0	0	0	0	0	13.38688	18.93190
6.5	0.980392	0.980392	171.4397	140.7820	83.04934	60.80463	134.9003	95.62225
7.5	0	0	56.49717	79.89907	0	0	0	0
8.5	0	0	45.66210	64.57596	35.08771	49.62152	67.45017	47.81112
9.5	0	0	0	0	0	0	0	0

Tiefe	16°C, 2 Tage		5 Tage		9 Tage		15 Tage	
0.5	681.8181	681.8181	500.5331	231.6689	698.0777	287.7919	434.9176	438.0793
1.5	172.4137	172.4137	115.8645	83.92422	65.35947	92.43225	114.9425	162.5532
2.5	0	0	0	0	65.35947	92.43225	90.09009	127.4066
3.5	0	0	0	0	90.09009	127.4066	114.9425	162.5532
4.5	172.4137	172.4137	45.66210	64.57596	50.50505	71.42492	205.0326	148.1406
5.5	172.4137	172.4137	272.5482	98.24673	151.5151	214.2747	90.09009	127.4066
6.5	172.4137	172.4137	91.32420	129.1519	0	0	114.9425	162.5532
7.5	0	0	161.5266	25.14149	90.09009	127.4066	0	0
8.5	0	0	65.35947	92.43225	101.0101	142.8498	205.0326	148.1406
9.5	0	0	65.35947	92.43225	50.50505	71.42492	0	0

Anhang E

Tab.2 Rote Luminophoren (250-500 nm) bei 4°C, 8°C und 16°C

Tiefe	4°C, 2 Tage		5 Tage		9 Tage		15 Tage	
0.5	580.4544	160.2863	808.1174	186.0338	1155.078	174.2270	1502.855	154.3696
1.5	437.2860	66.91565	685.5588	210.3780	494.9453	294.2131	195.0056	114.6364
2.5	450.1244	198.0236	254.7762	69.51575	95.95753	69.31593	49.01960	69.32419
3.5	84.03361	84.03361	14.68428	20.76671	42.19409	59.67145	0	0
4.5	42.01680	42.01680	0	0	0	0	17.82531	25.20879
5.5	84.03361	84.03361	0	0	0	0	0	0
6.5	84.03361	84.03361	0	0	0	0	0	0
7.5	0	0	0	0	0	0	0	0
8.5	0	0	0	0	0	0	0	0
9.5	0	0	0	0	0	0	0	0

Tiefe	8°C, 2 Tage		5 Tage		9 Tage		15 Tage	
0.5	1673.160	88.74458	1651.605	69.68176	1633.998	18.21456	1604.843	67.54734
1.5	38.96103	38.96103	82.78867	58.78317	105.5904	21.07847	111.3091	34.91314
2.5	51.94805	51.94805	0	0	25.54278	36.12295	28.79585	26.23340
3.5	0	0	0	0	0	0	0	0
4.5	0	0	0	0	0	0	7.645259	10.81203
5.5	0	0	0	0	0	0	11.87537	9.381209
6.5	0	0	21.78649	30.81075	0	0	0	0
7.5	0	0	0	0	0	0	0	0
8.5	0	0	0	0	0	0	0	0
9.5	0	0	0	0	0	0	0	0

Tiefe	16°C, 2 Tage		5 Tage		9 Tage		15 Tage	
0.5	1089.285	339.2857	583.3333	824.9579	1629.350	131.2859	1308.293	42.75606
1.5	664.8351	335.1648	0	0	137.9220	135.7762	365.5272	82.98517
2.5	0	0	0	0	0	0	83.33333	117.8511
3.5	0	0	0	0	0	0	0	0
4.5	0	0	0	0	0	0	0	0
5.5	0	0	0	0	0	0	0	0
6.5	0	0	0	0	0	0	0	0
7.5	0	0	0	0	0	0	0	0
8.5	0	0	0	0	0	0	0	0
9.5	0	0	0	0	0	0	0	0

Anhang E

Tab.3 Gelbe Luminophoren (125-250 nm) bei 8°C, 8°C und 16°C

Tiefe	4°C, 2 Tage		5 Tage		9 Tage		15 Tage	
0.5	2941.364	611.2672	6007.383	269.4754	6070.095	1100.785	6265.029	641.1366
1.5	2214.486	503.9601	755.2118	306.5794	795.0863	474.1396	718.5120	365.6352
2.5	1603.857	632.9841	429.0923	123.8759	571.3465	650.5280	376.7405	294.6211
3.5	485.4368	485.4368	0	0	0	0	0	0
4.5	48.54368	48.54368	0	0	0	0	73.26007	103.6053
5.5	0	0	0	0	0	0	29.23978	41.35127
6.5	145.6310	145.6310	22.42152	31.70882	8	0	8	0
7.5	48.54368	48.54368	28.98550	40.99169	8	0	8	0
8.5	0	0	0	0	0	0	0	0
9.5	0	0	0	0	0	0	0	0

Tiefe	8°C, 2 Tage		5 Tage		9 Tage		15 Tage	
0.5	7006.596	212.3382	5003.313	845.7361	6526.355	245.6100	6811.497	314.2660
1.5	214.0369	22.64941	579.7101	819.8339	612.1136	349.5051	524.2714	270.2544
2.5	95.69377	95.69377	0	0	176.0909	68.26425	87.36849	49.12601
3.5	143.5406	143.5406	205.5335	178.2096	63.90831	65.44876	0	0
4.5	0	0	0	0	0	0	45.41326	64.22404
5.5	0	0	0	0	0	0	10.01001	14.15629
6.5	0	0	733.1628	750.6973	0	0	0	0
7.5	0	0	0	0	17.92114	25.34432	0	0
8.5	0	0	0	0	17.92114	25.34432	0	0
9.5	0	0	0	0	0	0	0	0

Tiefe	16°C, 2 Tage		5 Tage		9 Tage		15 Tage	
0.5	5505.050	50.50505	5524.642	1182.542	5963.092	870.9784	4180.185	991.1116
1.5	1986.531	134.6801	980.3921	1386.483	495.7073	558.8203	2187.454	884.6804
2.5	0	0	90.09009	127.4066	70.92198	100.2988	535.3466	401.7298
3.5	0	0	0	0	106.0097	86.86294	254.2064	48.70924
4.5	0	0	0	0	416.6666	589.2556	146.6795	103.8870
5.5	0	0	0	0	212.7659	300.8965	0	0
6.5	0	0	968.4684	1095.530	208.3333	294.6278	151.5151	214.2747
7.5	0	0	0	0	0	0	0	0
8.5	0	0	32.67973	46.21612	0	0	0	0
9.5	0	0	0	0	0	0	0	0